Marcel Maris, André Jaumotte et Pierre Govaerts (dir.)

HISTOIRE DU NUCLÉAIRE EN BELGIQUE, 1990-2005

BNS
Belgian Nuclear Society

P.I.E. PETER LANG

P.I.E. PETER LANG

M. Maris, A. Jaumotte et P. Govaerts (dir.)

HISTOIRE DU NUCLÉAIRE EN BELGIQUE, 1990-2005

Histoire du nucléaire en Belgique, 1990-2005



P.I.E. Peter Lang

Bruxelles · Bern · Berlin · Frankfurt am Main · New York · Oxford · Wien

Marcel MARIS, André JAUMOTTE et Pierre GOVAERTS (dir.)

Histoire du nucléaire en Belgique, 1990-2005

Cet ouvrage, sélection de contributions d'auteurs belges renommés, a été élaboré à l'initiative d'A. Jaumotte, de L. Bindler et de P. Govaerts. Qu'ils soient remerciés pour leurs efforts et leur collaboration à l'organisation de celui-ci.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite par quelque procédé que ce soit, sans le consentement de l'éditeur ou de ses ayants droit, est illicite. Tous droits réservés.

© P.I.E. PETER LANG S.A.
Éditions scientifiques internationales
Bruxelles, 2007
1 avenue Maurice, B-1050 Bruxelles, Belgique
www.peterlang.com ; info@peterlang.com

Imprimé en Allemagne

ISBN 978-90-5201-377-0
D/2007/5678/61

Information bibliographique publiée par « Die Deutsche Bibliothek »

« Die Deutsche Bibliothek » répertorie cette publication dans la « Deutsche Nationalbibliografie » ; les données bibliographiques détaillées sont disponibles sur le site http://dnb.ddb.de.

Table des matières

Remerciements 11
Dankwoord 13

Synthèse de l'histoire nucléaire en Belgique,
période : 1990-2005 15
Marcel Maris

Synthese van de Belgische nucleaire geschiedenis,
periode : 1990-2005 31
Marcel Maris

PARTIE I
FORMATION DANS L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET RECHERCHE UNIVERSITAIRE

La formation dans l'enseignement supérieur 49
Michel Giot, Michèle Coeck, Jean Morelle et François Tondeur

La recherche universitaire 71
Paul-Henri Heenen

Le Centre de recherches du cyclotron de l'UCL à Louvain-la-Neuve 79
Jean Vervier

La physique des réacteurs à l'ULB (1960-2000) 87
Ernest Mund

PARTIE II
RECHERCHE & DÉVELOPPEMENT ET INDUSTRIE

SCK•CEN – Évolution 1990-2005 99
Pierre D'hondt

L'Institut national des radioéléments (IRE)
MDS Nordion s.a. et Sterigenics 137
Henri Bonet

TRANSRAD, l'histoire d'un succès 157
François De Smedt

La gestion des déchets radioactifs 161
Jean-Paul Minon et Brigitte Cornélis

Belgonucleaire 1990-2005 185
Jean Van Vliet, Alain Michel et Léon Bindler

Transnubel. Le transport des matières radioactives et nucléaires 201
Jean Van Vliet, Alain Michel et Serge Hérin

IBA. Le nucléaire au service de la vie 209
Yves Jongen

Tractebel Engineering 237
Jean Van Vyve

Electrabel. Quinze années de production nucléaire d'électricité en Belgique 255
Robert Leclère

PARTIE III
LES APPLICATIONS MÉDICALES

Synthèse 285
Janos Frühling

Description générale de la médecine nucléaire 287
Janos Frühling et Anne Delcorde

Techniques classiques de médecine nucléaire 293
Claudine Als

La tomographie d'émission de positons en Belgique Les années 1990-2005 301
Serge Goldman

Utilisation thérapeutique de radioisotopes pendant la période 1990-2005 311
Patrick Flamen et Pierre Bourgeois

PARTIE IV
LA FUSION THERMONUCLÉAIRE CONTRÔLÉE

La fusion thermonucléaire contrôlée 321
Paul Vandenplas

PARTIE V
LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE, LA RADIOPROTECTION ET LEUR CONTRÔLE

La sûreté nucléaire, la radioprotection et leur contrôle 333
Pierre Govaerts et Pierre Tonon

PARTIE VI
CONTEXTE POLITIQUE ET INSTITUTIONNEL

Le Forum nucléaire belge. Informer en toute transparence 357
Marcel Gaube

La loi sur la sortie du nucléaire.
Une loi de son époque, amphibologique et en continuel devenir 363
Pierre Tonon

La Commission AMPERE 373
Ernest Mund

Désarmement et plutonium.
Dix ans d'action par les milieux académiques 407
André L. Jaumotte, Alain Michel et Pierre Goldschmidt

PARTIE VII
LE CADRE INTERNATIONAL
Non-prolifération nucléaire (AIEA), désarmement, contrôle des exportations et lutte contre le terrorisme

Politique de la Belgique en matière de non-prolifération
dans le cadre du TNP et de l'AIEA 417
Michel Adam

Le protocole additionnel 423
Mireille Claeys et Pierre Goldschmidt

La Convention sur la protection physique
des matières nucléaires 429
Mireille Claeys

Code de conduite sur la sûreté et la sécurité
des sources radioactives, orientations pour l'importation
et l'exportation de sources radioactives 435
Mireille Claeys

La Convention internationale pour la répression
des actes de terrorisme nucléaire 439
Mireille Claeys

La résolution 1540 du Conseil de sécurité des Nations unies 441
Mireille Claeys

Politique de la Belgique en matière de contrôle
des armements nucléaires (hors TNP et AIEA) 443
Michel Adam

Le Traité d'interdiction complète des essais nucléaires 447
Michel Adam

PARTIE VIII
CONCLUSION

Histoire du nucléaire en Belgique (1990-2005). Conclusion 453
Léon Bindler, Pierre Govaerts et André L. Jaumotte

Abréviations 459

Remerciements

Le livre *Un demi-siècle de nucléaire en Belgique*, édité en 1994 par Pierre Govaerts, André Jaumotte et Jacques Vanderlinden sous l'égide de la BNS, témoigne du développement de l'énergie nucléaire entre 1945 et 1993 et indique que la BNS est prête à envisager la publication d'addenda suivant le besoin.

Suite à une initiative de André Jaumotte, de Léon Bindler et de Pierre Govaerts en début 2006, ce premier addendum a été rédigé pour synthétiser les développements qui ont eu lieu entre 1990 et 2005. En effet, nombreux sont les événements nationaux, internationaux, et les nouveaux défis qui jalonnèrent cette période.

André Jaumotte et Léon Bindler établirent un groupe de travail formé des principaux auteurs de cet addendum et qui en élabora la structure et le calendrier de soumission des contributions. Comme pour le livre, la BNS accepta de patronner l'édition de l'addendum et de participer à la gestion des activités. Chaque contribution a été soumise à une lecture collégiale et critique de personnes qui étaient familiarisées avec le sujet.

Grâce à l'appui et l'autorité de André Jaumotte, ainsi qu'aux efforts de plusieurs personnes de haute compétence technique, cet addendum a pu être réalisé dans un délai tout à fait raisonnable. Que tous ceux qui ont rendu possible la publication de cet addendum soient très sincèrement et très cordialement remerciés.

Je vous invite désormais à prendre connaissance des différents domaines nucléaires dans lesquels la Belgique a fait preuve d'excellence et a gardé ou développé une renommée internationale.

Marcel Maris
Président de la BNS (2006-2007)

Dankwoord

Het boek *Un demi-siècle de nucléaire en Belgique*, uitgegeven in 1994 door Pierre Govaerts, André Jaumotte et Jacques Vanderlinden onder de bescherming van de BNS, beschrijft de ontwikkeling van de nucleaire energie tussen 1945 en 1993 et vermeldt dat de BNS bereid is addenda te publiceren naar behoefte.

Als gevolg van het initiatief van André Jaumotte, Léon Bindler et Pierre Govaerts aanvang 2006, werd dit eerste addendum opgesteld om de ontwikkelingen die plaats vonden tussen 1990 en 2005 synthetisch samen te vatten. Inderdaad, deze 15 jaren werden gekenmerkt door een aantal belangrijke nationale en internationale gebeurtenissen alsook door nieuwe uitdagingen.

André Jaumotte en Léon Bindler richtten een werkgroep op, waarop verschillende auteurs werden uitgenodigd. Deze groep definieerde de grote lijnen van het addendum alsook de termijnen voor het afleveren van de bijdragen. Zoals dit ook gebeurde voor het boek heeft de BNS aanvaard de uitgave van dit addendum te patroneren en de activiteiten te beheren. Elke tekst werd onderworpen aan een collegiale en kritische commentaar en dit door personen die met het betrokken onderwerp vertrouwd waren.

Dankzij de ondersteuning en de autoriteit van André Jaumotte, alsook de inspanningen van verschillende personen met hoge deskundigheid kon dit addendum worden gerealiseerd binnen een redelijke termijn. Mijn zeer welgemeende en hartelijke dank gaat uit naar allen die de publicatie van dit addenda hebben mogelijk gemaakt.

Ik nodig daarom u uit kennis te nemen van de verschillende nucleaire domeinen in dewelke België uitstekend werk heeft verricht en een internationale faam heeft behouden of ontwikkeld.

Marcel Maris
Voorzitter van de BNS (2006-2007)

Synthèse de l'histoire du nucléaire en Belgique, période : 1990-2005

Marcel MARIS

Président de la BNS (2006-2007)

Ce premier addendum au livre *Un demi-siècle de nucléaire en Belgique*, publié en 1994 a été rédigé pour synthétiser les développements réalisés pendant les années 1990-2005. En effet, ces quinze années se caractérisent par un nombre important d'évènements nationaux et internationaux et aussi par de nouveaux défis. Il a été jugé important de consolider cette histoire dans cet addendum.

I. Formation dans l'enseignement supérieur et recherche universitaire

A. Formation dans l'enseignement supérieur

Dans les pays de l'Europe de l'Est, les réacteurs à eau pressurisée sont devenus une source d'énergie fiable et sûre et leur utilisation est soutenue par les gouvernements respectifs. Des plans récents de développement de centrales nucléaires, en Chine par exemple, indiquent un intérêt nouveau pour cette technologie qui permet de réduire la dépendance du pétrole, du gaz et d'autres sources fossiles. Dans l'Europe des quinze, il n'y a que la France et récemment la Finlande qui adoptent cette même stratégie. Le gouvernement belge a opté pour l'arrêt définitif des centrales nucléaires après quarante ans d'exploitation comme en témoigne l'arrêté royal du 31/01/2003 sur la sortie progressive de l'énergie nucléaire à des fins de production industrielle d'électricité.

L'arrêt de la construction de nouvelles centrales, qui a été imposé de fait avant la libération du marché de l'électricité, a diminué l'intérêt des jeunes à développer leur carrière dans le nucléaire, bien que ce domaine présente toujours plusieurs possibilités d'emploi et d'épanouissement dans des domaines divers de la technologie et les facteurs organisationnels et humains.

Reconnaissant l'importance de l'éducation en ingénierie nucléaire, plusieurs universités belges ont pris l'initiative de joindre leurs forces pour créer le *Belgian Nuclear Higher Educational Network* (BNEN), qui a son siège au SCK•CEN, offrant un curriculum qui conduit à l'obtention d'un diplôme de *Master of Nuclear Engineering*. La BNEN a d'ailleurs été prise comme référence pour la création de son équivalent au niveau européen : la *European Nuclear Educational Network* (ENEN).

Les instituts supérieurs d'ingénieur industriel offrant une spécialisation nucléaire ont vu le nombre de leurs étudiants pour cette spécialisation diminuer et se sont vu obligés de réduire leur offre d'options. Il subsiste cependant une haute école par régime linguistique : het eXpertisecentrum voor Industrie, Onderwijs en Samenleving (XIOS) à la Hogeschool Limburg, et l'Institut supérieur industriel de Belgique (ISIB) à Bruxelles.

B. Formation et recherche universitaire

La recherche en physique des hautes énergies est bien organisée au niveau national, avec des groupes essentiellement complémentaires dans plusieurs Universités. En particulier, un Pôle d'attraction interuniversitaire (PAI) réunit depuis 2002 tous les groupes de théoriciens et d'expérimentateurs actifs dans le domaine. Ce projet ambitieux d'études théoriques et expérimentales intégrées des interactions fondamentales a permis à la Belgique d'obtenir grande visibilité internationale par rapport aux budgets alloués et à la taille de chacun des groupes.

La physique des basses énergies recouvre la physique nucléaire fondamentale au sens large. L'étude des propriétés du noyau atomique a débuté dans les années 1950 dans les cinq grandes universités belges. Elle a connu une impulsion considérable à la fin des années 1980 grâce à un projet d'accélération d'ions radioactifs au cyclotron de Louvain-la-Neuve (LLN), projet qui a réuni plusieurs des groupes belges travaillant dans le domaine. Grâce à cette collaboration, toujours active, et au PAI qui y est associé, le cyclotron de Louvain-la-Neuve a joué un rôle de pionnier dans le développement des faisceaux radioactifs, qui fait l'objet actuellement de nombreuses avancées dans le monde. Des résultats importants expérimentaux et théoriques ont été obtenus par les équipes belges tant à LLN qu'auprès des grands accélérateurs mondiaux dans l'étude des cycles de nucléosynthèse stellaire, des propriétés des noyaux éloignés de la stabilité, dans le développement de méthodes de mesure des moments électromagnétiques des noyaux et de détecteurs performants pour l'étude des collisions profondément inélastiques entre deux noyaux. Des études d'interactions faibles sont effectuées pour mettre en évidence, dans la désintégration bêta de noyaux atomiques, des effets qui ne peuvent pas être expliqués par le modèle standard.

C. Le Centre de recherches du cyclotron de l'UCL à Louvain-la-Neuve

De 1990 à 1998, les activités du Centre de recherches du cyclotron de l'UCL à Louvain-la-Neuve ont connu de grandes avancées : diversification des faisceaux accélérés, faisceaux d'ions radioactifs, faisceaux d'ions lourds stables, faisceaux de neutrons rapides ; diversification des applications de ces faisceaux, dans la recherche fondamentale en physique et astrophysique nucléaires, dans la recherche appliquée en chimie et médecine nucléaires, dans les applications industrielles et spatiales, membranes de micro filtration et dégâts radiatifs ; diversification aussi dans les utilisateurs de ces faisceaux, au niveau belge dans le cadre de Pôle d'attraction interuniversitaire (PAI), au niveau européen grâce à des contrats avec la Commission européenne ainsi qu'au niveau mondial.

À partir de 1998, le non-remplacement des physiciens travaillant auprès du cyclotron et partant à la retraite a malheureusement entraîné un ralentissement des activités en physique nucléaire au profit de deux autres orientations : la climatologie et la physique des hautes énergies. Les programmes de physique et astrophysique nucléaires continuent avec le support de la Commission européenne : exploitation des faisceaux d'ions radioactifs, des faisceaux monocinétiques de neutrons rapides et des faisceaux d'ions lourds stables.

La production de *membranes microporeuses* et l'étude des *dégâts radiatifs* dans différents matériaux, dans le cadre notamment de l'ESA avec le développement de dispositifs semi-conducteurs résistant aux rayonnements, sont poursuivies. Le CRC soutient aussi le développement de faisceaux extrêmement intenses du noyau radioactif ^{18}Ne, composante essentielle de ce programme des *Beta Beams*.

D. La physique des réacteurs à l'ULB (1960-2000)

Depuis sa création, le service de métrologie nucléaire de l'ULB a produit environ 500 publications de haut niveau. Le cadre permanent maintient des relations internationales permettant de nombreux échanges dans les deux sens. Les publications se font de manière extrêmement régulière dans des revues internationales de premier plan couvrant tous les domaines étudiés : physique des réacteurs, mathématiques appliquées, physique nucléaire et instrumentation, beam-foil spectroscopy, transport d'électrons, fiabilité, etc. La participation aux conférences internationales est elle aussi presque systématique. Ces activités continuent et leur intégration au sein des réseaux de recherche étrangers est reconnue comme nécessaire pour construire ensemble les développements scientifiques du futur.

II. Recherche & Développement et industrie

A. SCK•CEN

Le Centre d'étude de l'énergie nucléaire (SCK•CEN), fondé en 1952, a poursuivi ses programmes de recherche et de développement, adaptés aux nouveaux besoins.

En 1991, les activités non nucléaires furent transférées au VITO, ce qui se traduisit par une forte diminution des moyens financiers et de l'effectif du personnel de cet institut, appelé « le Centre » par beaucoup de personnes.

Le SCK•CEN se lança toutefois dans la voie de la renaissance qualitative et de nos jours, il est toujours un centre de recherche nucléaire mondialement reconnu, qui met son expertise au service du monde scientifique et de la société. Il est actif dans la technologie des réacteurs, la radioprotection, les déchets et leur évacuation, la communication et la formation

Le réacteur BR1 reste destiné à la recherche fondamentale propre. Le réacteur BR2 a connu une modernisation et est à présent, tout comme le Laboratoire de haute et de moyenne activité (LHMA), surtout utilisé pour la recherche sur les matériaux, pour la production de radioisotopes, pour la médecine nucléaire et pour l'irradiation de silicium, pour la micro-électronique. Le BR3, qui fut arrêté en 1987, a permis d'acquérir les connaissances techniques et scientifiques nécessaires au démantèlement d'un réacteur dans des conditions réelles. Le réacteur VENUS permet de réaliser une analyse détaillée des configurations de cœurs et est utilisé de manière intensive pour l'optimisation du cycle du combustible et pour, entre autres, la validation des codes de criticité. Depuis 1994, le SCK•CEN fait également de la recherche dans le domaine du développement de systèmes ADS (*Accelerator Driven System*). Le but est que MYRRHA devienne le premier projet de démonstration d'un nouveau type de systèmes nucléaires, actionnés par un accélérateur de particules. Il sera à même de fournir des protons et des neutrons pour divers projets de R&D, dont la transmutation des déchets nucléaires, ainsi que pour la recherche de matériaux pour les réacteurs actuels et futurs. MYRRHA pourrait également être utilisé pour la production de radioisotopes.

Le SCK•CEN engage ses moyens de recherche dans le cadre de la protection de l'homme et de l'environnement contre les radiations ionisantes, dans le cadre des applications médicales des radiations ionisantes, du plan d'urgence, de la radiobiologie, de la radio-écologie et de la recherche spatiale : effets des rayons cosmiques et de l'apesanteur sur les astronautes et sur les instruments. Le SCK•CEN participe également à l'évolution de la spectrométrie et de la dosimétrie.

Depuis une dizaine d'années, on accorde également de plus en plus d'attention à l'appui à la politique, aux stratégies décisionnelles et à la recherche dans le cadre de l'intégration des aspects sociaux et éthiques des applications nucléaires.

La recherche par SCK•CEN et ONDRAF concernant le stockage définitif des déchets à haute activité et longue demi-vie est en cours. Grâce à son laboratoire souterrain HADES, situé à une profondeur de 225 mètres, le SCK•CEN a pu acquérir une expérience internationalement reconnue dans le domaine de l'enfouissement géologique de déchets radioactifs dans l'argile.

Le Centre a pu se constituer une solide réputation en tant que centre d'information et de formation. Il est le siège du *Belgian Nuclear Higher Educational Network*. Lors de la réorganisation, en 2006, le groupe d'expertise CEK (*Communication, Education and Knowledge Management*) fut créé. Ce groupe a pour tâche d'améliorer la notoriété de l'expertise et de la vision du SCK•CEN, d'encourager le cheminement des informations et de stimuler une culture de débat.

B. IRE, MDS Nordion s.a., Sterigenics et Transrad

C'est au SCK•CEN qu'un service de production de radioéléments a été crée par René Constant. La production du ^{131}I a été mise au point dans les années 1950 et le service a développé des applications en médecine et en biologie, mais aussi dans l'industrie et dans diverses branches de la recherche et de l'étude de l'environnement. Par la fondation de l'Institut national des radioéléments (IRE), obtenue le 20 août 1971, l'IRE reprend les activités du service des Radioéléments du SCK•CEN et, plus tard, installera son siège d'exploitation à Fleurus. L'IRE est un établissement d'utilité publique de droit privé, comme le SCK•CEN.

L'IRE a étendu ses activités au service des applications médicales et industrielles. L'expertise de l'IRE en matière de sources scellées a été à la base de plusieurs applications dans l'industrie et dans la brachythérapie. Différentes applications de stérilisation par irradiation γ ont été développées. Celles-ci sont actuellement reprises par la société Sterigenics. L'IRE a développé un procédé pour l'extraction de trois produits de la fission de l'uranium, le ^{99}Mo, le ^{131}I et le ^{133}Xe pour en déduire des produits radiopharmaceutiques. D'autres isotopes pour usage médical ont été produits.

En 1990, l'IRE a cédé à Nordion la partie radiopharmaceutique de ses activités qui concernent le ^{131}I et le ^{133}Xe, ainsi que des productions de sources scellées. Ceci a créé deux sociétés qui sont à la fois concurrents et fournisseurs mutuels.

Ion beam applications (IBA) a été créé en 1986 avec le support de l'IRE, qui reste un actionnaire de référence. La collaboration entre IRE et IBA n'a cessé de se développer depuis. Une nouvelle filiale IBA-Radioisotopes est créée sur le site de Fleurus avec un nouveau type de cyclotron. Cette installation est devenue aujourd'hui le centre de recherche européen d'IBA notamment en matière de développement de produits TEP. Récemment, suite à une invitation de IBA, l'IRE a acquis une majorité dans une société française sœur (CIS Bio) pour renforcer sa position sur le marché des isotopes à usage médical. La coopération entre ces deux sociétés constitue un renfort mutuel.

L'IRE a cherché des partenaires industriels pour assurer un réseau de transport fiable pour approvisionner des clients nationaux et internationaux de produits radioactifs pharmaceutiques, souvent de courte demie-vie, dans les temps voulus. La société Transrad a ainsi été créée. Pratiquement 20 ans après sa création, Transrad est devenue un joueur incontournable sur la scène internationale de la logistique nucléaire, grâce à son savoir-faire et la confiance dont elle bénéficie de la part des autorités compétentes, de sa clientèle et de ses actionnaires.

C. La gestion des déchets radioactifs

La gestion des déchets radioactifs, du ressort de l'ONDRAF a connu des avancées importantes dans la plupart des domaines durant la période 1990-2005. Les défis actuels se concentrent sur la gestion à long terme.

Les trois avancées les plus notables relatives aux *déchets* proprement dits sont : l'établissement d'un système de classification des déchets conditionnés, l'établissement d'un inventaire des déchets et sa mise à jour quinquennale et enfin, l'établissement d'un système d'acceptation des déchets.

Les activités de *gestion à court terme* ont été développées et structurées et sont aujourd'hui des opérations industrielles effectuées en routine.

Les activités de *gestion à long terme* s'effectuent en routine pour ce qui concerne l'entreposage. En ce qui concerne la mise en dépôt, le programme catégorie A (déchets de faible et moyenne activité et de courte durée de vie) est entré en phase de projet ; le programme B&C (déchets de haute activité et/ou de longue durée de vie) est au stade des études de recherche, du développement et de la démonstration.

La prise de conscience par l'ONDRAF de l'importance des aspects sociétaux dans ses programmes de dépôt a été l'aspect le plus déterminant des travaux menés dans ce cadre depuis le milieu des années 1990. Elle s'est matérialisée par le développement, en 1998, d'une méthodologie participative innovante pour établir un dialogue avec la population dans le cadre du programme de gestion des déchets de faible activité (catégorie

A), suivie de sa mise en œuvre. Ce développement belge suscite un intérêt international. Une réflexion est en cours quant à la meilleure façon d'engager un dialogue sociétal au sujet du programme de gestion des déchets de moyenne et haute activité (catégories B&C).

L'*assainissement* des héritages nucléaires du passé ou « *passifs nucléaires* » des sites BP1 et BP2 de Belgoprocess et du SCK•CEN a considérablement progressé.

Le premier exercice d'*inventaire des passifs nucléaires*, qui a été clôturé en 2002, a permis d'estimer à 5,7 milliards EUR le coût total de déclassement et d'assainissement des sites nucléaires existants, y compris le coût d'assainissement des passifs nucléaires existants et le coût de la gestion des déchets radioactifs. D'après les informations dont l'ONDRAF a pu avoir connaissance, ce coût était couvert à raison de 85 % par les provisions existantes ou par les provisions qui seront constituées dans le cadre des mécanismes de financement existants.

Le principal acquis en matière de *financement* des activités de l'ONDRAF est la mise au point d'un outil pour le financement des opérations techniques *de gestion à long terme*. Le fonds à long terme, devenu opérationnel en 1999, doit assurer à l'ONDRAF la couverture de ses coûts fixes d'entreposage et de mise en dépôt et lui assurer la couverture des coûts variables correspondants au fur et à mesure qu'ils apparaissent.

D. Belgonucleaire 1990-2005

La Belgonucleaire (BN) a développé un vrai savoir-faire dans le domaine de la technologie de la fabrication du combustible mixte UO_2-PuO_2 ou « MOX ».

Au total, sur 20 ans, 657 t de MOX ont été fabriquées pour la France, l'Allemagne, la Belgique, la Suisse et le Japon. Des contributions essentielles ont été réalisées au développement des usines MOX en France, au Japon et aux États-Unis, tant par la conception que par la fourniture d'équipements. Quarante tonnes de plutonium ont été traitées en Belgique, donnant du travail à 250 personnes pendant 20 ans, dans les meilleures conditions de sécurité et de qualité. Enfin, la BN a eu un rôle très important dans le développement du recyclage du plutonium militaire en MOX aux USA mais aussi en Russie

Dans la période 1992-2005, la BN a dû tenir compte des oppositions politiques belges et de la concurrence française. Ainsi, les possibilités de développement de son marché en Russie et aux États-Unis ont été entravées. La BN s'est vue contrainte d'arrêter ses activités de fabrication et de procéder au démantèlement de ses installations à Dessel. Après 50 ans d'efforts soutenus qui avaient placé la Belgique depuis les années 1960 à la pointe du savoir-faire en matière de traitement du plutonium et de ses

déchets, cette fermeture marque un point peu réjouissant dans l'histoire nucléaire belge.

E. Transnubel. Le transport des matières radioactives et nucléaires et ses activités associées

Transnubel (TNB) a été créé par Belgonucleaire (BN) en 1969 avec comme objectif de permettre le transport sûr de toute matière radioactive ou nucléaire. Les actionnaires originaux de TNB étaient BN et des sociétés du groupe Transnucléaire, déjà bien établi internationalement dans le domaine du transport nucléaire. TNB a pu très rapidement asseoir sa réputation internationale, avec accès non seulement aux marchés belges et internationaux mais aussi à des parcs d'emballages de transport, indispensables à ce genre d'activité. TNB a développé des emballages spécifiques, pour les déchets nucléaires, le plutonium et le combustible MOX. Plus de 300 transports d'assemblages MOX vers des centrales nucléaires situées en Belgique, en Allemagne ou en Suisse ont été effectués et la participation de la société au stockage de combustibles irradiés sur les sites des centrales a été développée.

Transnubel a fait évoluer ses activités de manière importante, particulièrement dans les années 1990 à 2005. De société de transport qu'elle était au moment de sa fondation, elle est progressivement devenue une société de services associés au transport de matières nucléaires et radioactives. L'arrêt du retraitement a accéléré ce mouvement en amenant la société à développer de plus en plus ses activités vers l'amont du cycle et vers les services aux exploitants de centrales : ingénierie, fourniture d'équipement et prestations de service sur site dans le cadre de la gestion des combustibles irradiés. Ces services connaissent un développement constant en Europe.

F. IBA. Le nucléaire au service de la vie

L'industrie belge a fait ses preuves aussi dans le domaine de la production de cyclotrons pour usage médical ou autre. La société IBA, créée comme *spin-off* de l'UCL en 1986, a connu un développement important et est devenue une référence mondiale dans le domaine de la radiothérapie, notamment la protonthérapie. Ses cyclotrons sont exportés vers plusieurs pays et pourront être utilisés dans des *Accelerator Driven Systems* comme MYRRHA, en cours de développement au SCK•CEN.

G. Tractebel

Tractebel Engineering a pu conserver et développer un savoir-faire de tout premier plan dans le domaine de l'ingénierie nucléaire, tant en support au fonctionnement et à la modernisation des centrales exploitées

par Electrabel en Belgique, qu'au travers de multiples contrats réalisés à l'étranger.

Des développements importants ont été réalisés dans différents domaines comme les calculs mécaniques de structures y compris la fatigue, des études neutroniques des cœurs de réacteur, la mécanique de rupture, des études d'accidents de dimensionnement des centrales nucléaires, des codes neutroniques/thermohydrauliques couplés, des programmes d'ingénierie dans plusieurs domaines techniques, la caractérisation des combustibles irradiés et des déchets radioactifs, le démantèlement, les évaluations périodiques de sûreté.

Tractebel Engineering a également participé à des programmes de recherche financés notamment par la Commission européenne. Tractebel Engineering, ensemble avec Electrabel et Belgonucleaire, a également établi un renom important dans les projets d'assistance aux exploitants de centrales nucléaires dans les pays de l'Est, dont certains ont joint l'Union européenne le 1er mai 2004.

H. Electrabel. Quinze années de production d'électricité nucléaire en Belgique

Electrabel a continué l'exploitation de ses deux sites nucléaires en visant l'excellence dans le domaine de la sûreté de ses installations. Toutefois, l'opinion publique a été marquée par l'accident de Tchernobyl. En Belgique, il en a résulté un report *sine die* de toute nouvelle centrale. Cette situation a perduré depuis le refus de la huitième centrale électronucléaire (N8) en 1988 jusqu'à l'adoption, en 2003, de la loi de retrait progressif du nucléaire, prévoyant que les unités arrêteraient leur production après 40 ans de d'exploitation.

Cet environnement peu favorable aux centrales nucléaires n'a pas empêché les investissements d'Electrabel, par exemple, dans les remplacements des générateurs de vapeur dans toutes les unités, sauf de Doel 1, où il est prévu en 2009. Ceci montre aussi que l'exploitant et son bureau d'études Suez-Tractebel Engineering maintiennent la capacité de réaliser de grands projets à complexité technique élevée. Electrabel dispose également de participations dans les unités B1 et B2 à Chooz. Les évènements du 11 septembre 2001 aux États-Unis ont mis en évidence que des attaques intentionnelles pourraient poser problème aussi pour des installations nucléaires et des mesures ont été exécutées pour renforcer les protections déjà mises en œuvre auparavant.

En mars 1995, l'unité de Tihange 2 a effectué le premier chargement de huit assemblages de MOX (*Mixed OXyde*). Ces assemblages MOX, résultant du recyclage du combustible usé, ont ainsi été chargés lors de cinq rechargements de cœurs à Tihange 2 et douze autres à Doel 3, et ce

jusqu'en 2006. Des recharges avec de l'uranium récupéré du retraitement ont également été effectuées. L'usage de ces assemblages a donné entière satisfaction. Quant au combustible usé pour lequel il n'y a pas eu de contrats de retraitement, des solutions de stockage intermédiaire ont été mises en place sur les deux sites.

L'impact de l'intervention humaine sur la sûreté de l'exploitation est davantage reconnu. L'optimisation de l'organisation, la formation de tout le personnel et en particulier la formation d'opérateurs de réacteur sur des simulateurs à pleine échelle, l'usage du retour d'expérience nationale et internationale en support de la politique de prévention, ainsi qu'une attention accrue pour la culture de sûreté, illustrent l'importance attachée à cet aspect.

Outre qu'ils étaient déjà certifiés ISO 9000, les deux sites sont maintenant certifiés ISO 14001. Ils sont enregistrés comme conformes au règlement EMAS. Ces labels d'excellence sont octroyés aux organisations qui s'engagent volontairement dans la protection environnementale. Les sites se sont donc dotés d'un outil global de gestion reconnu. En matière de sûreté, un audit OSART (*Operational Safety Review Team*) organisé par l'Agence internationale de l'énergie atomique à la demande des autorités de sûreté nucléaire belges) s'est déroulé à la centrale nucléaire de Tihange du 7 au 23 mai 2007. Les conclusions présentées par le chef de la délégation OSART ont été globalement positives et encourageantes.

Les changements politiques dans l'Union soviétique et dans les pays limitrophes ont changé les relations entre l'Europe de l'Est et l'Europe occidentale de façon dramatique, notamment dans le domaine de la production nucléaire de l'électricité. La Belgique a joué un rôle non négligeable dans l'amélioration de la sûreté nucléaire dans ces pays, dont certains sont devenus des états membres de l'Union européenne au 1er mai 2004 et au 1er janvier 2007.

III. Les applications médicales

A. Introduction générale de la médecine nucléaire

Dans ce chapitre, les auteurs définissent la médecine nucléaire en tant que technique médicale de diagnostic et de thérapeutie, en explicitant sa nature et ses origines.

Ils esquissent ensuite différentes périodes d'évolution de cette spécialité médicale, insérées dans l'évolution générale d'autres techniques d'imagerie.

La période de 1990 à 2005 voit l'éclosion et le développement de la technique de PET et plus tard, de PET-CT avec le ^{18}F-FDG comme

traceur universel dominant. Le PET trouve son application majeure en oncologie.

Enfin, les auteurs énumèrent différentes conditions légales et sociétales qui vont influencer dans l'avenir proche l'exercice de la médecine nucléaire en Belgique.

B. Techniques classiques de médecine nucléaire

L'évolution de la médecine nucléaire classique en Belgique entre 1990 et 2005 est caractérisée par le progrès technologique. Ainsi, de nouveaux radiotraceurs sont désormais disponibles. De plus, la performance des méthodes tomoscintigraphiques augmente. Il en résulte des indications cliniques plus diversifiées et un diagnostic scintigraphique plus adapté à la clinique en 2005 qu'en 1990. La communication avec les cliniciens aussi bien qu'avec les patients s'en retrouve améliorée.

Différentes techniques de médecine nucléaire sont actuellement appliquées. Leur fréquence et leur pertinence dépendent de facteurs cliniques, de spécificités institutionnelles et personnelles locales ainsi que de la performance de méthodes alternatives. À l'avenir, le SPECT-CT continuera à accentuer le devenir 'tomographique' de la médecine nucléaire en Belgique.

C. La tomographie d'émission de positrons en Belgique : les années 1990-2005

La période de 1990 à 2005 voit l'éclosion et le développement de la technique de la *Positron Emission Tomography* (PET) ou Tomographie d'émission de positons (TEP) et plus tard, de PET-CT avec le [^{18}F]2-fluoro-2-D-desoxyglucose comme traceur universel dominant. Le PET trouve son application majeure en oncologie. L'apport des chercheurs belges au développement de la TEP comme méthode, aujourd'hui irremplaçable, d'imagerie médicale fonctionnelle a été important. Indiscutablement, la Belgique a pris dans ce domaine une place bien supérieure à celle que son positionnement dans le monde industriel et économique aurait permis de présager. Les raisons de ce succès belge sont à rechercher dans la qualité synergique de ses traditions en physique nucléaire, en radiochimie et en médecine clinique.

D. Utilisation thérapeutique des radioisotopes pendant la période 1990-2005

Durant la période 1990-2005 différents radiopharmaceutiques ont été utilisés dans une optique thérapeutique dans les services de médecine nucléaire. L'effet thérapeutique de ces radiopharmaceutiques est basé sur l'émission de rayonnement de haute énergie (souvent de type β-) dans

leur entourage direct au niveau de l'organe ou de la tumeur ciblée. La sélectivité du radiopharmaceutique permet de délivrer de hautes doses dans la cible avec peu de dégâts collatéraux au niveau des organes voisins. À l'exception des traitements classiques (tel que l'iode 131 pour le traitement des cancers thyroïdiens), des nouveaux radiopharmaceutiques sont tout récemment rendus disponibles pour une utilisation en médecine nucléaire. Grâce à ces nouveautés, l'utilisation thérapeutique des radioisotopes connaîtra vraisemblablement une période de croissance.

IV. La fusion thermonucléaire contrôlée

La Belgique participe, depuis 1968, à l'effort européen en vue de réaliser la fusion thermonucléaire contrôlée, par le biais de l'Association « Euratom-État belge ». Différents laboratoires belges contribuent à l'effort belge dans ce domaine : le *Plasma Physics Laboratory*, École royale militaire – Koninklijke militaire school, l'Unité de physique statistique et plasmas de l'ULB, le Centre d'étude de l'énergie nucléaire/ Studiecentrum voor kernenergie et l'industrie. L'Association « Euratom-État belge » est ainsi un des acteurs européens dans l'effort mondial pour maîtriser l'énergie de fusion et obtenir, suite au réacteur expérimental ITER, les premiers réacteurs commerciaux.

V. La sûreté nucléaire, la radioprotection et leur contrôle

La nouvelle loi du 15 avril 1994 relative à la protection de la population et de l'environnement contre les dangers résultant des rayonnements ionisants et relative à l'Agence fédérale de contrôle nucléaire (AFCN) a introduit un changement important dans l'organisation du contrôle des installations nucléaires. Elle fut rendue exécutoire par l'arrêté royal du 20 juillet 2001 portant règlement de la protection des personnes et de l'environnement contre le danger des rayonnements ionisants (RGPRI). La nouvelle autorité nucléaire – l'AFCN – devint opérationnelle le 1er septembre 2001. Les différentes disciplines, qui auparavant ressortissaient aux compétences de différents ministères, ont été regroupées au sein de l'AFCN, permettant ainsi une gestion plus harmonisée.

Depuis la création de l'AFCN, des discussions avec les organismes agréés ont été initiées pour développer une approche commune tout en utilisant au mieux les compétences de l'AFCN et de ces organismes.

L'AFCN et AVN ont participé à l'établissement des critères communs de référence pour la sûreté des centrales nucléaires européennes en exploitation et pour la gestion des déchets de ces mêmes installations. Ces « niveaux de référence de WENRA » constituent des critères auxquels tous les états nucléaires de l'Union européenne souscrivent. Les autorités nucléaires de ces pays, dont la Belgique, se sont engagées à compléter

leur législation nucléaire pour 2010 afin que celle-ci soit harmonisée au niveau européen.

VI. Contexte politique et institutionnel

A. Le Forum nucléaire belge. Informer en toute transparence

Le Forum nucléaire belge, constitué en 1972, s'est donné pour mission d'informer les médias, le monde politique et le grand public. Vers la fin des années 1970, son but principal devient le soutien au développement du nucléaire, en Belgique, et de ses applications énergétiques.

Progressivement, le Forum commencera également à suivre les dossiers qui font l'actualité de la technologie nucléaire en Belgique. Ce sera le cas pour l'organisation de séminaires et de visites de formation à l'attention de la presse et du monde politique mais aussi pour la publication du bulletin d'information « Actualité Nucléaire » dont une soixantaine de numéros ont été diffusés largement au public, aux médias, aux milieux universitaires, au monde politique belge, aux forums étrangers et à Foratom.

Le Forum s'est adressé de façon croissante au monde des décideurs politiques ; c'est ainsi, par exemple, que des rencontres spécifiques sont organisées lors des voyages d'étude afin de donner aux décideurs la possibilité de mettre l'énergie nucléaire dans le contexte des défis énergétiques en Europe et dans le monde.

B. La loi sur la sortie du nucléaire

Le monde politique a toutefois décidé l'arrêt des centrales belges après 40 ans d'exploitation. Le débat sur cet arrêt n'est certainement pas terminé et différentes parties et organisations défendent le pour et le contre de cette loi.

Ainsi, une nouvelle Commission (« Commission 2030 ») d'études a été constituée le 6 décembre 2005 par arrêté royal. Elle a remis son rapport définitif en juin 2007, soit peu avant les élections législatives. Ce rapport présente les choix stratégiques de politique énergétique à moyenet long terme et conclut notamment que l'option nucléaire devait rester ouverte.

C. La Commission AMPERE

La Commission AMPERE (Analyse des modes de production de l'électricité et le redéploiement des énergies) a été mise en place début 1999 par le ministre de l'Énergie de l'époque et avait pour mission d'analyser les moyens de production d'électricité à l'horizon de 2020. Après

les élections législatives du 13 juin 1999, la mission de la Commission fut élargie avec l'examen de la sortie du nucléaire au-delà des 40 ans de durée de vie des centrales et de la gestion de la demande d'électricité.

Le bilan des retombées du rapport AMPERE est plutôt maigre et il s'agit bien de la volonté du ministre responsable. N'ayant pas plu à ce dernier, le rapport est progressivement tombé dans l'oubli et n'a donc pas joué de rôle dans la discussion de la loi sur la sortie du nucléaire.

D. Désarmement et plutonium. Dix ans d'action par les milieux académiques

Le recyclage du plutonium militaire a donné lieu à des débats politiques pendant plusieurs années parce que les options des Américains (empoisonnement et évacuation géologique comme déchet) et des Russes (usage dans des réacteurs civils) étaient contradictoires. Dans une certaine mesure, on peut dire que l'expérience belge et l'obstination à la mettre en avant, ont joué un certain rôle dans les conclusions de la *National Academy of Sciences* des États-Unis (qui admet enfin la validité des deux options) qui, à leur tour, vont peser lourd sur les choix ultérieurs. Grâce à la pression soutenue des scientifiques, il y a eu finalement un accord sur le recyclage de cette source d'énergie importante. Les conférences Amaldi et Pughwash, dans lesquelles les scientifiques belges ont joué un rôle important, y ont contribué de façon significative. La Belgique a pris une part active dans l'élaboration des nouvelles « *Guidelines for the Management of Plutonium* », en collaboration avec les 5 pays détenteurs « agréés » d'armes nucléaires et les 4 autres pays gestionnaires de plutonium civil uniquement : le Japon, l'Allemagne, la Suisse et la Belgique.

VII. Le cadre international

Les impératifs de la non-prolifération et de la coopération européenne dans le domaine de la maîtrise des armements nucléaires restent des éléments essentiels de la politique extérieure de la Belgique au début du 21e siècle. Le contexte international est toutefois marqué par l'émergence de menaces nouvelles : terrorisme nucléaire et apparition de capacités nucléaires militaires d'états refusant les contraintes du Traité de non-prolifération des armes nucléaires (T.N.P.).

La Belgique fait du T.N.P. la « pierre angulaire » du régime international de non-prolifération nucléaire et la base de la poursuite du désarmement nucléaire et de la coopération internationale en matière d'utilisation pacifique de l'atome. Cette conception se traduit par l'engagement de la diplomatie belge en faveur du système des garanties de l'AIEA et par la part qu'elle a prise dans la négociation du protocole additionnel. Tous les engagements récents de la Belgique en matière de non-prolifération

supposent une politique rigoureuse en matière de contrôles des exportations.

La Belgique a continué à fournir à l'AIEA des collaborateurs de haut niveau scientifique et technique. Il convient de noter particulièrement la présence de 1999 à 2005 du Dr Pierre Goldschmidt dans les fonctions de directeur général adjoint, responsable du département des Garanties, l'une des plus hautes fonctions de l'Agence et le poste le plus important occupé jusqu'ici par un Belge au sein de cette organisation.

La Belgique a été active dans plusieurs autres fora, comme la Convention sur la protection physique des matières nucléaires, le Code de conduite sur la sûreté et la sécurité des sources radioactives, la Convention internationale pour la répression des actes de terrorisme nucléaire, le contrôle des armements nucléaires, le Traité d'interdiction complète des essais nucléaires.

La Belgique répond de manière satisfaisante aux obligations de la Résolution 1540 du Conseil de sécurité des Nations unies concernant les armes de destruction massive. Pour le secteur nucléaire, elle possède une législation nationale déjà très complète, à laquelle s'ajoutent les nombreux instruments internationaux dont elle est partie (Convention sur la protection physique des matières nucléaires, Traité de non-prolifération des armes nucléaires, Accord de garanties et Protocole additionnel, Traité Euratom) ainsi que les directives et les règlements européens pertinents en matière de non-prolifération. Il est intéressant de noter que la Belgique dispose d'un cadre juridique prévoyant des mesures de surveillance aux stades de la fabrication, du stockage et du transport des matières nucléaires et radioactives pouvant contribuer à la prévention de la prolifération nucléaire.

Synthese van de Belgische nucleaire geschiedenis, periode : 1990-2005

Marcel MARIS

Voorzitter van de BNS (2006-2007)

Dit eerste addendum aan het boek *Un demi-siècle de nucléaire en Belgique*, uitgegeven in 1994, werd opgesteld om de ontwikkelingen tijdens de jaren 1990-2005 synthetisch weer te geven. Inderdaad, deze vijftien jaren werden gekenmerkt door een aantal belangrijke nationale en internationale gebeurtenissen alsook door nieuwe uitdagingen. De consolidatie van deze geschiedenis in dit addendum werd daarom belangrijk geacht.

I. Opleiding in het hoger onderwijs en het universitair onderzoek

A. Opleiding in het hoger onderwijs

In de landen van Oost-Europa zijn de drukwaterreactoren een betrouwbare en veilige energiebron geworden en hun gebruik wordt door de betrokken regeringen ondersteund. Recente ontwikkelingsplannen voor kerncentrales, bijvoorbeeld in China, zijn het gevolg van een vernieuwde interesse voor deze technologie die de mogelijkheid geeft de afhankelijkheid van petroleum, gas en andere fossiele bronnen te verminderen. In het Europa van de vijftien is er enkel Frankrijk en recent ook Finland die dezelfde strategie toepassen. De Belgische regering heeft geopteerd voor een definitieve stop van de kerncentrales na veertig jaar exploitatie : Koninklijk besluit van 31/01/2003 betreffende de progressieve uitstap uit de industriële productie van elektriciteit met behulp van kernenergie.

Het moratorium aangaande de bouw van nieuwe centrales, die eigenlijk reeds in voege was vóór de liberalisering van de elektriciteitsmarkt, heeft de interesse van de jongeren voor een nucleaire loopbaan verminderd, alhoewel het nucleaire domein nog altijd verschillende mogelijkhe-

den voor werk en persoonlijke ontwikkeling in diverse technologische domeinen en menselijke en organisatorische factoren biedt.

De opleiding als nucleair ingenieur blijft echter belangrijk en daarom hebben verschillende Belgische universiteiten het initiatief genomen en hun krachten gebundeld om het *Belgian Nuclear Higher Educational Network* (BNEN), met zetel in het SCK•CEN, op te richten, met een curriculum dat leidt tot de toekenning van het diploma *Master of Nuclear Engineering*. De BNEN heeft trouwens model gestaan voor de oprichting van zijn equivalent op Europees niveau : het *European Nuclear Educational Network* (ENEN).

De hogere instituten van industrieel ingenieur die een nucleaire specialisatie aanboden hebben het aantal studenten voor deze specialisatie zien verminderen en hebben zich verplicht gezien slechts één hogere school per taalregime te behouden : het eXpertisecentrum voor Industrie, Onderwijs en samenleving (XIOS) in de Hogeschool Limburg en l'Institut supérieur industriel de Belgique (ISIB) te Brussel.

B. Opleiding en onderzoek op universitair niveau

Het onderzoek in de fysica van de hoge energieën is op nationaal niveau goed georganiseerd, met nadruk op de complementariteit van de groepen. Een bijzondere vermelding gaat naar de Pôle d'attraction interuniversitaire (PAI) die sedert 2002 de theoretici en experimentators heeft doen samenwerken. Dit ambitieus project van geïntegreerde theoretische en experimentele studies over fundamentele interacties heeft toegelaten dat België een opmerkelijke internationale zichtbaarheid kreeg, dit in vergelijking met de eerder beperkte budgetten van elk van de deelnemende groepen.

De fysica van de lage energieën betreft de fundamentele nucleaire fysica in de brede zin. De studie van de eigenschappen van de atoomkern begon in de jaren 1950 in de vijf grote Belgische universiteiten. Ze kende een belangrijke impuls einde der jaren 1980, dankzij de versnelling van radioactieve ionen in het cyclotron van Louvain-la-Neuve (LLN). Dit project verenigde verschillende Belgische onderzoekers die in hetzelfde domein werkzaam waren. Dankzij deze nog steeds bestaande samenwerking en in de ermee verbonden PAI heeft het cyclotron van LLN een pioniersrol gespeeld in de ontwikkeling van radioactieve bundles en heeft tot verschillende ontwikkelingen over heel de wereld aanleiding gegeven. Belangrijke resultaten werden geboekt in de analyse van de cyclus van de stellaire nucleosynthese, de studie van het geheel van de eigenschappen van kernen die zich ver buiten hun stabiele toestand bevinden (onder meer P_b^{186}), de ontwikkeling van meetmethodes van elektromagnetische momenten van de kernen, performante detectoren voor de studie van

essentieel inelastische botsingen tussen twee kernen en andere fenomenen. De studies van zwakke interacties worden uitgevoerd om bij de beta-desintegratie van atoomkernen verschijnselen aan te tonen die niet door de standaardmodellen kan worden uitgelegd.

C. Het Centre de recherches du cyclotron de l'UCL *te Louvain-la-Neuve*

In de periode 1990-1998 hebben de activiteiten van het Centre de recherches du cyclotron van de UCL te Louvain-la-Neuve een opmerkelijke ontwikkeling gekend : diversificatie van versnelde bundels, bundels van radioactieve ionen, bundels van zware stabiele ionen, bundels van snelle neutronen ; diversificatie van de toepassingen van deze bundels in het fundamenteel onderzoek in de nucleaire fysica en astrofysica, in het toegepast onderzoek in de scheikunde en nucleaire geneeskunde, in de industriële aanwendingen en ruimtetoepassingen, microfiltratiemembranen en stralingsschade ; diversificatie bij de gebruikers van deze bundels, op Belgisch niveau in het kader van de Pôle d'attraction interuniversitaire (PAI), op Europees vlak dank zij de contracten met de Europese Commissie en op wereldvlak.

Vanaf 1998 werden de fysici die met het cyclotron verbonden waren en die met pensioen gingen niet vervangen. Dit leidde spijtig genoeg tot een vertraging van de activiteiten in de nucleaire fysica en werden twee andere oriëntaties bevoordeligd : de klimatologie en de fysica van de hoge energieën. De programma's van de fysica en de astrofysica worden voortgezet met de steun van de Europese commissie : exploitatie van bundels van radioactieve ionen, monokinetische neutronenbundels et stabiele zware ionenbundels.

De productie van de microporeuze *membranen* en de studies van stralingsschade in verschillende materialen, onder meer de ontwikkeling van stralingsongevoelige halfgeleiders in het kader van de ESA, wordt voortgezet. Het CRC ondersteunt ook de ontwikkeling van zeer energieintense bundels van radioactieve kernen van ^{18}Ne, wat essentieel is voor het programma *Beta Beams*.

D. De reactorfysica van de ULB (1960-2000)

Sedert zijn oprichting heeft de service de métrologie nucléaire van de ULB ongeveer 500 publicaties van hoog niveau afgeleverd. Het permanente kader onderhoudt de internationale betrekkingen die talrijke uitwisselingen in beide richtingen toelaat. De publicaties verschijnen zeer regelmatig in internationale tijdschriften van eerste rang. Ze dekken alle bestudeerde domeinen : reactorfysica, toegepaste wiskunde, nucleaire fysica en instrumentatie, beam-foilspectroscopie, elektronentransport,

betrouwbaarheid enz. De deelname aan internationale conferenties gebeurt eveneens zeer regelmatig. Deze activiteiten worden verder gezet en hun integratie in het internationale onderzoeksnetwerk wordt als noodzakelijk aanzien om tezamen aan de toekomstige wetenschappelijke ontwikkelingen te werken.

II. Onderzoek – Ontwikkeling en industrie

A. SCK•CEN

Het SCK•CEN, opgericht in 1952, heeft zijn onderzoeks – en ontwikkelingsprogramma's voortgezet, aangepast aan de nieuwe behoeften.

In 1991 werden de niet nucleaire activiteiten getransfereerd naar het VITO, wat een belangrijke vermindering van de financiële middelen en van het personeel van « het Centrum », zoals dit instituut in de gangbare taal wordt genoemd, leidde.

SCK•CEN heeft kordaat voor de kwalitatieve renaissance gekozen en vandaag is het nog steeds een internationaal erkend onderzoekscentrum, die zijn expertise ten dienste stelt van de wetenschappelijke wereld en van de maatschappij. Zijn werkdomein omvat de reactortechnologie, de stralingsbescherming, de afval en hun evacuatie, de communicatie en de opleiding.

De BR1reactor blijft verbonden met het fundamenteel onderzoek. De BR2reactor onderging een modernisatie en wordt vandaag, zoals ook het laboratorium voor hoge en middelactiviteit (LHMA), vooral aangewend voor het materiaalonderzoek, de productie van radioisotopen voor de nucleaire geneeskunde en voor de bestaling van silicium voor de microelektronica. De BR3reactor, die gestopt werd in 1987, onderging een ontmantelingsprogramma, wat toeliet belangrijke technische en wetenschappelijke kennis op te doen voor een reactor in reële omstandigheden. De VENUSreactor laat toe verschillende kernconfiguraties in detail te analyseren en wordt intensief gebruikt voor de optimalisatie van de splijtstofcyclus en onder andere ook voor de validatie van criticaliteitscodes. Sedert 1994 voert het SCK•CEN eveneens onderzoek uit in het kader van de ontwikkeling van een ADS-systeem (*Accelerator Driven System*). Het doel is dat MYRRHA het eerste demonstratieproject wordt voor een nieuw type van nucleaire systemen, aangedreven door een deeltjesversneller. Deze reactor zal protonen en neutronen kunnen leveren voor verschillende R&D-projecten, waaronder de transmutatie van nucleaire afval en het onderzoek van materialen voor huidige en toekomstige reactoren. MYRRHA zou eveneens gebruikt kunnen worden voor de productie van radioisotopen.

Het SCK•CEN zet zijn middelen eveneens in voor de bescherming van de mens en van de omgeving tegen ioniserende stralingen, in het kader van medische toepassingen van ioniserende stralingen, het noodplan, de radiobiologie, de radioecologie en het ruimteonderzoek : effecten van kosmische stralen en van de gewichtloosheid op de astronauten en instrumenten. Het SCK•CEN neemt eveneens deel aan de evolutie van de spectrometrie en de dosimetrie.

Sedert een tiental jaren wordt er meer en meer aandacht besteed aan de ondersteuning van de politiek, de strategische beslissingsprocessen en aan het onderzoek in het kader van de integratie van de sociale en ethische aspecten in nucleaire toepassingen.

Het onderzoek door het SCK•CEN en het NIRAS betreffende de definitieve opslag van hoogactieve afval met lange levensduur is lopende. Dankzij zijn ondergronds laboratorium HADES, dat zich bevindt op een diepte van 225 meter, heeft het SCK•CEN een internationaal erkende ervaring in het bergen van afval in kleilagen opgedaan.

Het Centrum heeft ook een grote reputatie verworven als opleidingscentrum. Het is de zetel van het *Belgian Higher Nuclear Educational Network*. Tijdens de reorganisatie in 2006 werd de groep CEK (*Communication, Education and Knowledge Management*) opgericht. Deze expertisegroep heeft als taak de faam en de visie van het SCK•CEN te verhogen, de communicatie van informatie aan te moedigen en een debatcultuur te stimuleren.

B. IRE, MDS Nordion s.a., Sterigenics en Transrad

In het SCK•CEN werd door René Constant een dienst opgericht met het oog op de productie van radioisotopen. De productie van ^{131}I werd daar in de jaren 1950 op punt gesteld en de dienst heeft toepassingen in de geneeskunde, biologie, de industrie en in diverse domeinen van het onderzoek en van de studie van het milieu verder ontwikkeld. Door de oprichting van het Institut national des radioéléments (IRE) op 20 augustus 1971, neemt het IRE de activiteiten van de dienst voor radioisotopen van het SCK•CEN over en vestigt wat later zijn exploitatiezetel in Fleurus. Het IRE is een stichting van openbaar nut volgens het privaatrecht, zoals het SCK•CEN.

Het IRE heeft zijn activiteiten in de medische en industriële domeinen uitgebreid. De deskundigheid van het IRE in het domein van ingekapselde bronnen lag aan de basis van verschillende industriële toepassingen en toepassingen in de brachytherapie. Verscheidene sterilisatietoepassingen door middel van γ-bestraling werden op punt gezet. Deze werden uiteindelijk overgenomen door de firma Sterigenics. Het IRE heeft een procédé ontwikkeld dat toelaat drie splijtingsproducten uit bestraald uranium te

onttrekken, namelijk ^{99}Mo, ^{131}I en ^{133}Xe, om er radiofarmaca van samen te stellen. Ook werden andere isotopen voor medisch gebruik ontwikkeld.

In 1990 heeft het IRE een deel van de productie van radiofarmaca (^{131}I en ^{133}Xe) overgedragen aan Nordion alsook de productie van ingekapselde bronnen. Dit heeft twee firma's geschapen die zowel concurrenten als mutuele toeleveranciers zijn.

Ion beam applications (IBA) werd in 1986 opgericht met de steun van het IRE, dat een referentieaandeelhouder blijft. De samenwerking tussen het IRE en IBA heeft zich sedertdien steeds verder ontwikkeld. Een nieuw filiaal IBA-Radioisotopes werd opgericht op de site van Fleurus en door gebruik te maken van een nieuw type van cyclotron. Deze installatie is tegenwoordig het Europees onderzoekscentrum van IBA onder meer voor de ontwikkeling van PET-producten. Recent heeft het IRE, gevolg gevend aan een uitnodiging door IBA, een meerderheidsparticipatie genomen in een Franse zustermaatschappij (CIS Bio) om zijn positie op de markt van medische toepassingen van radioisotopen te versterken. De samenwerking tussen deze twee firma's houdt ook een wederzijdse versterking in.

Het IRE heeft industriële partners gezocht om een betrouwbaar transportnetwerk uit te bouwen en zo zijn nationale en internationale klanten tijdig de radiofarmaca, die meestal een kort halfleven hebben, te kunnen bezorgen. De firma Transrad werd met dat doel opgericht. Nu 20 jaar na zijn oprichting is Transrad een onmisbare speler op de internationale scène van de nucleaire logistiek geworden. Dit is te wijten aan zijn deskundigheid en het vertrouwen vanwege de competente overheden, zijn klanten en zijn aandeelhouders.

C. Het beheer van radioactieve afval

Het beheer van radioactieve afval is de opdracht van het NIRAS en heeft belangrijke vorderingen gekend gedurende de periode 1990-2005 in bijna alle domeinen. De huidige uitdagingen hebben te maken met het langetermijnbeheer.

De drie belangrijkste vorderingen zijn het opstellen van een classificatiesysteem voor de geconditioneerde afval, het bepalen van de afvalinventaris alsook zijn vijfjaarlijkse bijwerking en een aanvaardingssyteem voor afval.

De *beheersactiviteiten op korte termijn* werden ontwikkeld en gestructureerd en zijn vandaag industriële routineoperaties geworden.

De *beheersactiviteiten op langetermijnbeheer* worden voor wat betreft de tijdelijke opslag routinematig uitgevoerd. De oppervlakteberging van afval van categorie A (lage en gemiddelde activiteit met korte levensduur) is in projectfase getreden. De berging van afval van categorie B&C

(afval van hoge activiteit en/of lange levensduur), is in het stadium van onderzoek, ontwikkeling en demonstratie.

Het NIRAS is bewust geworden van de sociale aspecten in verband met berging en dit heeft aanleiding gegeven tot een belangrijke ontwikkeling sedert het midden van de jaren 1990. In 1998 werd een heel nieuwe methodologie ontwikkeld om een participatieve discussie met de bevolking tot stand te brengen in verband met het beheersprogramma van afval met lage activiteit (categorie A) en de daaropvolgende implementatie. Deze Belgische ontwikkeling geniet een grote internationale aandacht. Een verdere reflectie is lopende om een sociale discussie op te starten aangaande het beheer van afval met middelhoge en hoge activiteit (categorie B&C).

Het *saneren van de nucleaire erfenissen* van het verleden, ook « nucleair passief » genoemd, van de sites BP1 en BP2 van Belgoprocess en van het Studiecentrum voor kernenergie (SCK•CEN) heeft sterke vorderingen gekend.

De eerste *inventaris van het nucleair passief*, die werd afgerond in 2002, liet toe de totale kost voor declassering en de sanering van de huidige nucleaire sites, tesamen met de sanering van het bestaand nucleaire passief en het beheer van de radioactieve stoffen, te ramen op 5,7 miljard EUR. Uit de door haar gekende informatie heeft het NIRAS kunnen afleiden dat deze kost voor 87 % zou gedekt zijn door de bestaande provisies of door de provisies die zullen geschapen worden in het kader van de bestaande financieringsmechanismen.

De belangrijkste realisatie in het kader van de *financiering van de activiteiten* van het NIRAS is het op punt stellen van een financieringswerktuig voor de *technische beheersactiviteiten op lange termijn*. Het langetermijnfonds, dat operationeel werd in 1999, verzekert het NIRAS de dekking van zijn vaste kosten en verzekert ook zijn variabele kosten naarmate deze optreden.

D. Belgonucleaire 1990-2005

Belgonucleaire (BN) heeft een grote kennis en kunde opgebouwd in de fabricagetechnologie voor splijtstof met gemengde oxides UO_2-PuO_2 of « MOX ».

In een periode van 20 jaar werden 657 ton MOX vervaardigd voor Frankrijk, Duitsland, België, Zwitserland en Japan. Tevens werden essentiële bijdragen geleverd tot de ontwikkeling van MOX-fabrieken in Frankrijk, Japan en de Verenigde Staten, zowel wat het ontwerp als de levering van uitrustingen betreft. BN heeft een centrale rol gespeeld in de ontwikkeling van recyclage van plutonium naar MOX in de Verenigde Staten, maar ook in Rusland. Veertig ton plutonium werden behandeld in

België, wat werk verschafte aan 250 personen gedurende 2 jaar met uitstekende kwaliteit en veiligheidsvoorwaarden.

In de periode 1992-2005 heeft BN rekening moeten houden met de Belgische politieke oppositie en met de Franse concurrentie, met als gevolg dat zijn marktontwikkeling in Rusland en in de Verenigde Staten werden verhinderd. BN heeft zich verplicht gezien zijn productie-activiteiten stop te zetten en aan te vangen met de ontmanteling van zijn installaties in Dessel. Na 50 jaar van onderhouden inspanningen, waarbij België aan de top van kennis en kunde in de behandeling van plutonium en van zijn afval stond, is deze sluiting een weinig verheugend feit in de Belgische nucleaire geschiedenis.

E. Transnubel. Het transport van radioactieve en nucleaire stoffen en bijhorende activiteiten

Transnubel (TNB) werd opgericht door Belgonucleaire (BN) in 1969, met als doelstelling een veilig transport van alle radioactieve en nucleaire stoffen te verzekeren. De originele aandeelhouders van TNB waren BN en firma's van de groep Transnucléaire, die zelf reeds kon bogen op een gevestigde internationale transportactiviteit voor nucleaire stoffen. TNB heeft zeer vlug zijn internationale reputatie kunnen verzekeren, dankzij zijn toegang tot de Belgische en internationale markt en tot transportverpakkingsparken die onmisbaar zijn voor dit type van activiteit. TNB heeft specifieke verpakkingen ontworpen voor nucleaire afval, plutonium en MOXsplijtstof. Meer dan 300 transporten van MOXsplijstofelementen naar kerncentrales in België, Duitsland en Zwitserland werden uitgevoerd. De firma nam tevens deel aan opslag van bestraalde splijtstof op de sites van de kerncentrales.

Transnubel heeft in de jaren 1990-2005 zijn activiteiten in een belangrijke mate verder ontwikkeld. Ze heeft haar activiteit als transportfirma, die ze initieel was, progressief uitgebouwd tot een firma die diensten verleent in het hele domein van het transport van nucleaire en radioactieve stoffen. Het stoppen van de opwerking van splijtstof heeft deze ontwikkeling versneld, met focus op de beginfase van de splijtstofcyclus en op de dienstverlening aan de exploitanten van kerncentrales : studiebureel, levering van uitrustingen en prestaties van diensten op de sites in het kader van het beheer van bestraalde splijtstof. Deze diensten kennen een stadige voortgang op Europees niveau.

F. IBA. Het nucleaire ten dienste van het leven

De Belgische industrie heeft een belangrijke bijdrage geleerd in het domein van de productie van cyclotrons voor medisch of ander gebruik. De firma IBA, opgericht als een *spin-off* van de UCL in 1986, kende een

belangrijke ontwikkeling en werd een internationale referentie in het domein van de radiotherapie, onder meer de protontherapie. Zijn cyclotrons worden uitgevoerd naar verschillende landen en zouden eveneens gebruikt kunnen worden in *Accelerator Driven Systems* zoals Myrrha, die in ontwikkeling is in het SCK•CEN.

G. Tractebel engineering

Tractebel Engineering heeft een uitstekende kennis en kunde in nucleaire activiteiten kunnen bewaren en verder ontwikkelen, zowel door ondersteuning aan de exploitatie en de modernisatie van de centrales die door Electrabel in België worden uitgebaat als door verscheidene contractuele activiteiten in het buitenland.

Belangrijke ontwikkelingen werden gerealiseerd in verscheiden domeinen zoals de berekeningen van mechanische structuren met inbegrip van vermoeiing, neutronenfysica van de reactorkernen, de breukmechanica, de dimensionerende ongevalstudies voor kerncentrales, gekoppelde neutronische/thermohydraulische codes, ontwerpen realisatieprogramma's in verschillende technische domeinen, de karakterisatie van verbruikte splijtstof en van radioactieve afval, de ontmanteling, de periodieke veiligheidsevaluaties.

Tractebel Engineering heeft eveneens deelgenomen aan onderzoeksprogramma's die door de Europese commissie werden gefinancierd. Tractebel Engineering, tezamen met Electrabel en Belgonucleaire, heeft ook een grote erkenning verworven in de ondersteuningprojecten ten voordele van de uitbaters van kerncentrales in de Oost-Europese landen.

H. Electrabel. Vijftien jaar nucleaire elektriciteitsproductie in België

Electrabel heeft de exploitatie, de efficaciteit en de veiligheid van zijn twee nucleaire vestigingsplaatsen op continue wijze verbeterd. Nochtans werd de publieke opinie sterk beïnvloed door het ongeval van Tchernobyl. Dit heeft in België geleid tot een uitstel *sine die* van een nieuwe kerncentrale. Deze toestand is niet veranderd en leidde tot de weigering van de achtste kerncentrale (N8) in 1988 en de uitvaardiging van de wet op de progressieve uitstap uit de nucleaire elektriciteitsproductie in 2003. Deze wet voorziet dat de eenheden zouden sluiten na 40 jaar exploitatie.

Deze voor kerncentrales weinig bevorderlijke atmosfeer heeft Electrabel niet weerhouden verder te investeren en bijvoorbeeld de stoomgeneratoren te vervangen in alle eenheden, behalve in Doel 1 waar de vervanging voorzien is in 2009. Dit toont aan dat de exploitant en zijn studiebureel Suez-Tractebel Engineering de capaciteit behouden om grote projecten met hoge technische complexiteit uit te voeren. Electrabel heeft

eveneens 25 % van de investering in de eenheden B1 en B2 te Chooz te zijner laste genomen. De gebeurtenissen van 11 september 2001 in de Verenigde Staten hebben aangetoond dat moedwillige aanvallen ook een probleem zouden kunnen zijn voor de nucleaire installaties en daarom werden bijkomende beschermingsmaatregelen ingevoerd, die de reeds bestaande beschermingen versterken.

In maart 1995 heeft de eenheid Tihange 2 de eerste lading van acht splijtstofelementen van het type MOX (*Mixed OXyde*) geladen. Deze MOXsplijtstofelementen zijn het resultaat van de recyclage van het plutonium dat werd gerecupereerd tijdens de opwerking van de gebruikte splijtstofelementen. Zo werden er vijf herladingen uitgevoerd in Tihange 2. In Doel 3 werden telkens 12 MOXelementen geladen tot en met 2006. Ook werden splijtstofelementen, die uit de opwerking gerecupereerd uranium bevatten, gebruikt in reactorherladingen. Al deze splijtstofelementen hebben een zeer bevredigend gedrag vertoond. De gebruikte splijtstof, voor dewelke geen opwerkingscontracten meer mochten worden afgesloten, werd tijdelijk opgeslagen op de nucleaire sites.

De impact van de menselijke handelingen op de nucleaire veiligheid tijdens exploitatie werd meer en meer erkend. De optimalisatie van de organisatie, de opleiding van al het personeel en in het bijzonder de opleiding van de reactoroperatoren op waarheidsgetrouwe simulatoren, het gebruik van de nationale en internationale ervaring als belangrijk element in de preventiepolitiek alsook een verhoogde aandacht voor de veiligheidscultuur illustreren het belang dat aan dit aspect wordt gegeven. De ontwikkeling van de probabilistische veiligheidsanalyse, die werd ingeleid door de publicatie WASH 1400, heeft stadig aan belang gewonnen.

Als gevolg van het ongeluk in Three Mile Island werden de studies van ongevallen gepaard gaande met kernsmelting ingevoerd in de veiligheidsstudies. De exploitant van de Belgische kerncentrales heeft preventieve maatregelen genomen en heeft tevens procedures ontwikkeld om zulke ongevallen te beheren.

Naast het feit dat beide nucleaire sites reeds een certificatie ISO 9000 bezaten hebben ze tevens een certificaat ISO 14001 bekomen. Ze werden geregistreerd als conform met de vereisten van EMAS. Deze uitmuntendheidslabels worden verleend aan de organisaties die zich vrijwillig inzetten voor de bescherming van de omgeving. De sites hebben dus een globaal en erkend beheerssysteem geïnstalleerd.

Op aanvraag van de Belgische nucleaire overheid heeft het International atoomenergieagentschap een OSART-audit (*Operational Safety Review Team*) uitgevoerd in de kerncentrale van Tihange. Deze audit greep plaats van 7 tot 23 mei 2007 en de besluiten, die door de leider van

het OSART werden voorgesteld, waren in hun geheel genolmen positief en bemoedigend.

De politieke veranderingen in de Sovjet-Unie en in de aangrenzende landen hebben de relaties tussen Oost- en Westeuropa op een dramatische wijze veranderd, onder meer in het domein van de nucleaire elektriciteitsproductie. België heeft een niet verwaarloosbare rol gespeeld in de verbetering van de nucleaire veiligheid in deze landen, waarvan er enkele lid zijn geworden van de Europese unie op 1 mei 2004 en op 1 januari 2007.

III. De medische toepassingen

A. Algemene inleiding tot de nucleaire geneeskunde

In dit deel definiëren de auteurs de nucleaire geneeskunde als een techniek voor diagnose en therapeutische behandelingen en lichten ze zijn inhoud en oorsprong toe.

Ze schetsen daarna de verschillende periodes van evolutie van deze geneeskundige specialiteit, verbonden met de evolutie van andere beeldvormingtechnieken.

De periode van 1990 tot 2005 wordt gekenmerkt door het ontstaan en de ontwikkeling van de PET-techniek en later de PET-CT met de ^{18}F-FDG als dominante universele merkstof. De PET vindt zijn voornaamste toepassing in de kankerbestrijding.

Als besluit formuleren de auteurs de verschillende wettelijke en sociale voorwaarden die de nabije toekomst de toepassingen van de nucleaire geneeskunde zullen beïnvloeden.

B. Klassieke technieken van de nucleaire geneeskunde

De evolutie van de klassieke nucleaire geneeskunde in België tussen 1990 en 2005 wordt gekenmerkt door de technologische vorderingen. Zo werden nieuwe radioactieve merkstoffen ontwikkeld. Daarbij vergroot de performantie van de tomoscintigrafische methoden. Daaruit volgt dat de klinische indicaties meer gediversifieerd worden en dat een scintigrafische diagnose een groter klinisch belang heeft in 2005 dan in 1990. De communicatie met de medici alsook met de patiënten wordt hierdoor positief beïnvloed.

Op dit ogenblik worden verschillende technieken toegepast in de nucleaire geneeskunde. Hun frequentie en hun pertinentie hangen af van klinische factoren, institutionele en personele bijzonderheden alsook van de performantie van de alternatieve methoden. De SPECT-CT zal de toekomst van de tomografie in België blijven accentueren.

C. De positronemissietomografie in België : de jaren 1990-2005

De periode van 1990 tot 2005 wordt gekenmerkt door het ontstaan en de ontwikkeling van de positronemissietomografie – techniek (PET) en later de PET-CT met de ^{18}F-FDG als dominante universele merkstof. De PET vindt zijn voornaamste toepassing in de kankerbestrijding. De bijdragen van de Belgische onderzoekers aan de ontwikkeling van de PET als, vandaag onvervangbare, functionele beeldvormingtechniek is belangrijk geweest. Het is ontegensprekelijk zo dat België in dit domein een veel hoger niveau heeft bereikt in vergelijking met wat men had kunnen voorspellen op basis van zijn industriële en economische positionering. De redenen van dit Belgisch succes zijn te vinden in de synergie van zijn tradities in de nucleaire fysica, de radiochemie en de klinische geneeskunde.

D. Het therapeutisch gebruik van de radioisotopen in de periode 1990-2005

In de periode 1990-2005 werden in de nucleaire geneeskunde verschillende radiofarmaceutica gebruikt als therapeutisch middel. Het therapeutisch effect van deze radiofarmaceutica is gebaseerd op de emissie van hoge energiestraling (dikwijls van het type β-) in de onmiddellijke omgeving van het orgaan of van de te behandelen tumor. De selectiviteit van de radiofarmaceutica laat toe hoge dosissen te veroorzaken in het beoogde orgaan met weinig effect op de nabijgelegen organen. Naast de klassieke behandelingen (zoals met jood 131 voor de behandeling van schildklierkanker) zijn nu heel recent nieuwe radiofarmaceutica beschikbaar geworden voor de nucleaire geneeskunde. Dankzij deze vernieuwingen zal het therapeutisch gebruik van radioisotopen waarschijnlijk groeien in de toekomst.

IV. De gecontroleerde thermische fusie

België neemt deel aan de Europese inspanning met het oog op de realisatie van een gecontroleerde thermonucleaire fusie in het kader van de Associatie « Euratom-Belgische staat » en dit sedert 1968. Verschillende Belgische laboratoria zetten hun werk in dit domein voort : het *Plasma Physics Laboratory*, École royale militaire – Koninklijke militaire school, l'Unité de physique statistique et plasmas van de l'ULB, le Centre d'études nucléaires/Studiecentrum voor kernenergie et l'Industrie. De Associatie « Euratom-Belgische staat » is dus één van de Europese acteurs die deelneemt aan de inspanning op wereldniveau om de fusie-energie te beheersen en op basis van de ervaring met de experimentele fusiereactor ITER, de eerste commerciële reactoren te realiseren.

V. De nucleaire veiligheid, de stralingsbescherming en hun controle

De nieuwe wet van 15 april 1994 houdende de bescherming van de bevolking en het leefmilieu tegen de uit de ioniserende stralingen voortspruitende gevaren en houdende de oprichting van her Federaal agentschap voor nucleaire controle (FANC) heeft een belangrijke wijziging in de organisatie van de controle van de nucleaire installaties teweeggebracht. Zijn uitvoering werd bepaald door de Koninklijke besluiten van 20/07/2001 waarbij de nieuwe nucleaire autoriteit, het FANC, operationeel werd vanaf 01/09/2001. De onderscheiden disciplines die voordien de bevoegdheid waren van verschillende ministeries werden nu aan het FANC toegewezen, wat een meer harmonieus beheer toelaat.

Sedert de oprichting van het FANC werden besprekingen met de erkende instellingen georganiseerd met het oog op de ontwikkeling van een gemeenschappelijke benadering, waarbij de competenties aanwezig in het FANC en in deze instellingen optimaal zouden kunnen benut worden.

Het FANC en AVN hebben deelgenomen aan het opstellen van gemeenschappelijke criteria voor de Europese kerncentrales in uitbating en voor het beheer van de radioactieve afval die door deze installaties wordt geproduceerd. Deze « WENRA-referentieniveaus » zijn criteria die alle nucleaire landen van de Europese unie onderschrijven. De nucleaire autoriteiten van deze landen, waaronder België, hebben beloofd hun nucleaire wetgeving tegen 2010 aan te passen om zo tot een nucleaire wetgeving te komen die geharmoniseerd is op Europees niveau.

VI. De politieke en institutionele context

A. Het Belgisch nucleair forum, informeren met volledige transparantie

Het Belgisch nucleair forum (het Forum), opgericht in 1972, had zich als opdracht gesteld de media, de politieke wereld en het publiek te informeren. Tegen het einde van de jaren 1970 wordt zijn belangrijkste doelstelling de ondersteuning van het nucleaire in België alsook van zijn energetische toepassingen.

Het Forum begon geleidelijk ook de wereld van de politieke beslissingen aan te spreken en de dossiers met nucleaire actualiteit in België op te volgen. Zo organiseert het Forum seminaries en opleidingsbezoeken ten behoeve van de pers en de politieke wereld en publiceert een informatiebulletin *Actualité Nucléaire* waarvan een zestigtal nummers in een groot aantal verspreid werden aan het publiek, de media, de universitaire milieus, de Belgische politieke wereld, aan internationale fora en aan Foratom.

Tijdens de laatste jaren heeft het Forum zijn acties versterkt in de richting van de politiek beslissers. Zo heeft het specifieke contacten georganiseerd tijdens studiereizen om de politieke beslissers de mogelijkheid te geven de nucleaire energie in de context van de energetische uitdagingen in Europa en in de wereld te plaatsen.

B. De wet op de uitstap uit het nucleaire

De politieke wereld heeft toch beslist de Belgische kerncentrales te sluiten na 40 jaar exploitatie. Het debat over deze sluiting is zeker nog niet beëindigd en verschillende partrijen en organisaties verdedigen de voor- en nadelen van deze wet.

Een nieuwe Commissie (« Commissie 2030 ») werd trouwens door het Koninklijk besluit opgericht op 6 december 2005 en heeft zijn definitief verslag overgemaakt in april 2007, juist vóór de federale verkiezingen van juni 2007. Dit verslag beschrijft dat de strategische keuzes aangaande de energiepolitiek op middellange en lange termijn en besluit dat de nucleaire optie zou moeten behouden blijven.

C. De Commissie AMPERE

De Commissie AMPERE (Analyse des modes de production de l'électricité et le redéploiement des énergies) werd opgericht begin 1999 door de toenmalige Minister van energie en had als opdracht de energieproductiemiddelen te analyseren met een horizon 2020. Na de federale verkiezingen van 13 juni 1999 werd de opdracht van de Commissie uitgebreid met het onderzoek van de uitstap uit het nucleaire na 40 jaar exploitatie van de kerncentrales en met het beheer van de behoeften aan elektriciteit.

Het bilan van het effect van het verslag AMPERE is eerder klein en het gaat hier vooral om de wil van de verantwoordelijke Minister. Daar het verslag niet positief werd onthaald door deze laatste is het geleidelijk in de vergeethoek geraakt en heeft het dus geen rol gespeeld in de besprekingen van de wet op de uitstap uit het nucleaire.

D. Ontwapening en plutonium. Tien jaar van acties door de academische milieus

De recyclage van militair plutonium heeft aanleiding gegeven tot politieke debatten gedurende verscheidene jaren, omdat de opties van de Amerikanen (vergiftiging) en van de Russen (gebruik in civiele reactoren) volledig tegenstrijdig waren. Men mag zeggen dat tot een zekere graad de Belgische ervaring en de koppigheid ze op het voorplan te brengen een bepaalde rol heeft gespeeld in de besluiten van de *National Academy of Sciences* van de Verenigde Staten (die uiteindelijk beide opties toelaat),

wat op zijn beurt zwaar zal wegen in de daaropvolgende besluiten. Dank zij de gestadige druk van de wetenschappers werd er uiteindelijk een akkoord bereikt over de recyclage van deze belangrijke energiebron. De conferenties Amaldi et Pughwash, tijdens dewelke de Belgische wetenschappers een belangrijke rol hebben gespeeld, hebben er in belangrijke mate toe bijgedragen. België heeft actief deel genomen in de uitwerking van de nieuwe « *Guidelines for the Management of Plutonium* », in samenwerking met de 5 landen die « officieel » nucleaire wapens bezitten en de 4 andere landen die enkel civiele plutonium beheren : Japan, Duitsland, Zwitserland en België.

VII. Het internationaal kader

De imperatieven van de non-proliferatie en van de Europese coöperatie in het domein van de beheersing van de nucleaire wapens blijven essentiële elementen van de Belgische buitenlandse politiek in het begin van de 21e eeuw. De internationale context is nochtans gekenmerkt door het verschijnen van nieuwe bedreigingen : nucleair terrorisme en het verschijnen van nucleaire militaire capaciteiten van staten die de beperkingen van het Verdrag van de non-proliferatie van nucleaire wapens (NPT) weigeren te aanvaarden.

België maakt van het NPT een hoeksteen van het internationaal regime van non-proliferatie en de basis voor het vervolg van de nucleaire ontwapening alsook de internationale coöperatie in het domein van het vredelievend gebruik van nucleaire energie. Dit concept vertaalt zich door de verbintenis van de Belgische diplomatie ten voordele van het systeem van de waarborgen en in zijn deel in de onderhandelingen over het Additioneel protocol. Alle recente verbintenissen aangegaan door de Belgische Staat in het domein van de non-proliferatie veronderstellen een rigoureuze politiek ten aanzien van de controle op de uitvoer.

België heeft steeds medewerkers van hoog wetenschappelijk en technisch niveau naar het IAEA afgevaardigd. Hierbij moet men in het bijzonder verwijzen naar de aanwezigheid van Dr Pierre Goldschmidt in de periode 1999-2005 als Adjunct directeur generaal verantwoordelijk voor het Departement van de waarborgen, een van de hoogste functies in het IAEA en de belangrijkste functie die ooit door een Belg in de IAEA werd waargenomen.

België was actief in meerdere andere fora, zoals de Conventie over de fysische bescherming van nucleair materiaal, de Gedragscode over de zekerheid en veiligheid van radioactieve bronnen, de internationale Conventie voor het onderdrukken van het nucleair terrorisme, de controle van de nucleaire wapens, het Verdrag over het algehele verbod van nucleaire testen.

België beantwoordt op bevredigende wijze aan de verplichtingen van de Resolutie 1540 van de Veiligheidsraad van de Verenigde naties betreffende wapens met massieve vernietigingskracht. Voor de nucleaire sector heeft België een nationale wetgeving die tamelijk volledig is en aan dewelke andere internationale instrumenten, waarvan ze deel uit maakt) toegevoegd zijn (Conventie over de fysische beveiliging van nucleaire materialen, Verdrag over de non-proliferatie van nucleaire wapens, Akkoord van de waarborgen en Additioneel protocol, Euratomverdrag) alsook de Europese directieven en reglementen betreffende de non-proliferatie. Het is nuttig op te merken dat België een juridisch kader bezit dat toezicht voorziet op de fabricatie, gebruik, opslag en transport van nucleaire en radioactieve materialen en aldus bijdraagt aan de preventie tegen de verspreiding van nucleaire wapens.

PARTIE I

FORMATION DANS L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET RECHERCHE UNIVERSITAIRE

La formation dans l'enseignement supérieur

Michel GIOT, Michèle COECK,
Jean MORELLE et François TONDEUR

Professeur à l'UCL
SCK•CEN
Belgonucleaire
Professeur à l'Institut supérieur industriel de Bruxelles

I. Introduction

La formation du personnel du secteur nucléaire et en particulier des centrales électronucléaires mérite une attention particulière des autorités responsables en raison des risques liés à la radioactivité. L'accident de criticité de Tokaï-Mura, qui témoigne d'un déficit de culture de sûreté, illustre cet aspect des choses qui concerne tant les ingénieurs que les techniciens : l'ignorance est source de danger. En outre, les connaissances théoriques ne suffisent pas. C'est pourquoi, dans les métiers du nucléaire, la formation théorique se double d'une formation pratique – en anglais le *training* – et l'ensemble est sanctionné par un système d'accréditations de différents niveaux ou « classes » qui ouvre l'accès à certaines professions. Bien que la formation pratique mérite qu'on s'y intéresse en raison de sa forte évolution liée au développement des outils de simulation, lui-même corrélatif au développement de l'informatique, c'est à la formation théorique que nous consacrerons ce chapitre.

Pour les universitaires, le nombre relativement limité d'emplois dans le secteur en Belgique, d'une part, et le caractère pointu des compétences nécessaires, d'autre part, justifient sans doute que l'on ait prévu des études complémentaires pour acquérir ces compétences : nous décrirons dans les paragraphes 2 et 3 l'évolution récente des diplômes complémentaires de génie nucléaire et de radioprotection, dont l'origine remonte à l'après-guerre. Seules l'UGent et l'ULB ont réussi à maintenir une option nu-

cléaire à l'intérieur des études de second cycle d'ingénieur civil physicien.

Pour les ingénieurs industriels, des formations complètes spécialisées sont organisées de longue date par plusieurs établissements en Flandre, en Wallonie et à Bruxelles. En outre, des passerelles permettent l'accès aux grades complémentaires mentionnés ci-dessus. Dans le paragraphe 4, nous évoquerons l'histoire récente de ces formations.

Parallèlement à l'évolution des connaissances scientifiques et aux progrès de la technologie, des besoins de formation continue se sont fait sentir. Nous verrons au paragraphe 5 comment s'est organisée la réponse à ces besoins.

Enfin, l'élément majeur de l'évolution récente est sans conteste l'apparition de la « dimension européenne » dans l'enseignement supérieur. On peut affirmer que dans le domaine de la formation aux sciences et techniques nucléaires, les Belges ont joué un rôle de pionniers et qu'ils ont réussi à susciter de l'enthousiasme pour une harmonisation des formations au niveau européen. Le processus conduisant aux premiers résultats concrets de cette harmonisation sera décrit dans le dernier paragraphe de ce chapitre, et en constituera la conclusion ouverte : l'histoire se poursuit.

II. La première étape du processus de regroupement des formations en génie nucléaire

Dans les années 1990 l'offre de formation en génie nucléaire consistait tant en Communauté flamande qu'en Communauté française en une année d'études complémentaires aux études d'ingénieur civil. Le programme pouvait être étalé sur deux ans pour les étudiants engagés dans une activité professionnelle. Au Nord cette sixième année d'études se donnait par alternance de deux ans à l'UGent et à la KULeuven. Le grade complémentaire portait le nom de « Gediplomeerde in de Gespecialiseerde Studies Nucleaire Kerntechniek » (GGS). Les responsables de programmes étaient, à Gand le prof. Fernand Vanmassenhove et à Leuven, successivement le prof. Paul De Meester jusqu'à son éméritat en 2000 puis le prof. William D'haeseleer. Le nombre d'étudiants entrants a toujours été inférieur à la dizaine, mais il ne faut pas perdre de vue que plusieurs cours pouvaient être suivis par des étudiants inscrits à d'autres programmes.

En Communauté française, quatre institutions, l'ULB, l'UCL, l'ULg et la FPMs, s'étaient accordées pour offrir en commun à partir de 1996 un « Diplôme Spécialisé en Génie Nucléaire » (DES). L'initiative de ce rapprochement revient au prof. Ernest Mund qui, exerçant ses fonctions de recherche au FNRS dans le laboratoire de métrologie du prof. Jacques Devooght, et dispensant son enseignement à l'UCL en contact étroit avec

le prof. Michel Giot, sut convaincre ses deux collègues de la pertinence d'un tel rapprochement. Chaque institution avait nommé deux représentants dans le comité directeur du programme : pour l'ULB ce furent les prof. Robert Beauwens et Jacques Devooght ; Ce dernier fut remplacé par le prof. Daniel Baye lors de son éméritat en 1998 ; Pour l'UCL, les prof. Michel Giot et Ernest Mund ; Pour l'ULg, les prof. Jacqueline Lecomte-Beckers et Philippe Mathieu ; enfin pour la FPMs, les prof. Jean-Marie Charlet, remplacé lors de son éméritat en 1997 par Claude Vandenberg et Robert Jadot. Les effectifs étudiants du DES étaient du même ordre de grandeur que ceux du GGS. La différence essentielle entre les deux programmes tient au fait qu'en Communauté française, chaque matière était offerte par une ou plusieurs universités, et que les étudiants voyageaient entre ces institutions. On avait bien sûr fait quelques efforts pour concentrer les horaires afin de limiter les navettes.

Les deux programmes relevaient d'une formation de troisième cycle et s'adressaient principalement aux ingénieurs fraîchement diplômés ainsi qu'à ceux ayant déjà acquis une expérience professionnelle. En dehors des ingénieurs, les licenciés en sciences physiques pouvaient être admis moyennant un programme adapté ; Les ingénieurs industriels, eux, se voyaient imposés une année préalable de mise à niveau, principalement constituée de cours à caractère mathématique.

La formation en génie nucléaire incluait un éventail de sciences et de techniques mutuellement complémentaires et trouvant application non seulement en production d'énergie, depuis la mise en œuvre de la matière première jusqu'au confinement des déchets, mais également en application des radiations et en études de sûreté d'installations techniques non nucléaires.

Comme aujourd'hui, le domaine d'activité du diplômé était certes celui de la production d'électricité, mais aussi celui des bureaux d'études spécialisées, de l'industrie des combustibles, de celle du traitement et du confinement des déchets ainsi que de la gestion ressortant des responsabilités du secteur public. De même des instituts de recherche tant technique que médicale utilisant les technologies nucléaires faisaient partie des débouchés.

Le GGS comme le DES visaient donc à permettre à leurs diplômés d'acquérir une solide base théorique relative aux spécificités des techniques nucléaires, base sur laquelle peut se développer la connaissance des applications. Les enseignements étaient fournis par des experts engagés personnellement soit dans des activités industrielles soit dans la recherche. Il en a d'ailleurs toujours été ainsi dans les facultés de sciences appliquées en Belgique, mais pour ce programme particulier, à finalité professionnelle marquée, les enseignants à temps partiel avaient un poids relatif plus important. Bornons-nous à citer ceux d'entre eux qui sont

intervenus à un moment donné dans les cours de base : pour le GGS, Jozef Claes (Belgoprocess), Paul De Jonghe (SCK•CEN), Jean Morelle (Belgonucleaire), André Poucet (CCR. Ispra), E. Selleslagh (UGent), Georges Smissaert (Electrabel), Elie Stubbe (Tractebel), Eric van Walle (SCK•CEN). Parmi les enseignants du DES, Pierre Govaerts (AVN), Jean Morelle (Belgonucleaire), Ernest Mund (FNRS), Patrick Raymond (CEA-France), Patrick Smeesters (AFCN), Jean-Jacques Van Binnebeek (AVN), Claude Vandenberg (Belgonucleaire) et Jean Van Vliet (Belgonucleaire). Par ailleurs, les cours à option ont fait appel à de nombreux autres experts du secteur nucléaire belge.

Pour assurer le succès des deux programmes, ne firent défaut ni les compétences des enseignants, ni leur conscience professionnelle, ni le nombre de réunions de coordination, ni le volume des rapports. Non, il ne manqua que des étudiants. Malgré tous les efforts déployés, leur recrutement demeura désespérément faible à une époque de moratoire sur le retraitement du combustible, à une époque de relative hostilité de l'opinion publique suite au choc de Tchernobyl, à une époque aussi de profil bas des exploitants : pas de projet innovant, ni en Belgique, ni ailleurs en Europe, peu de publicité autour de la production électronucléaire. Par ailleurs, comment proposer une sixième année d'études d'ingénieur à des étudiants qui rêvent de biotechnologies, de MBA, de création de PME ? Quel attrait pour un jeune diplômé flamand ou wallon de poursuivre dans sa région, dans sa langue, des études aux débouchés certains, certes, mais à court terme ? Comment susciter sa passion pour une technologie qui semble s'arrêter à l'enfouissement des déchets ? Pour l'éternité !

Certes, les efforts ont abouti à former quelques brillants élèves qui ont assuré la relève minimum à une époque de vaches maigres. Ils ont permis d'assurer la transition. Mais ils ne pouvaient pas se poursuivre au-delà des années 2000 sans réorientation majeure : en effet, leur pérennité pouvait être remise en question par le non-renouvellement des postes académiques au fur et à mesure des départs à la retraite. Les facultés, les départements, les collègues enivrés par le succès de la recherche dans les « bio-, nano- et info- » allaient-ils percevoir l'importance stratégique de l'énergie nucléaire pour l'Europe Occidentale, et proposer de recruter de jeunes collègues dans des disciplines promises apparemment à peu d'avenir ? La réponse n'allait pas de soi. Les responsables du GGS et du DES étaient inquiets ou résignés. On décida dans un premier temps de publier en un fascicule tête-bêche les brochures décrivant les deux programmes pour faciliter la mobilité des étudiants à travers le pays.

III. La création et les premiers pas de BNEN

L'idée d'une deuxième phase de regroupement germa dans les esprits en 1999, année de la création de la Commission Ampere. Une idée à contre-courant des pratiques et des tendances : fusionner le GGS et le DES en un seul enseignement qui serait donné en langue anglaise, et localisé en un lieu offrant un environnement humain et des infrastructures nucléaires de qualité incontestable : le Centre d'étude de l'énergie nucléaire (SCK•CEN). L'objectif à atteindre : rendre la formation plus attractive pour les étudiants par sa pluri-culturalité, plus convaincante pour le monde universitaire par sa proximité avec la recherche, plus visible pour l'ensemble du secteur nucléaire belge par sa taille, et en faire un pôle interuniversitaire belge rayonnant à travers l'Europe. L'idée, concertée avec les responsables du SCK•CEN séduisit plusieurs collègues des GGS et DES, mais en laissa d'autres sceptiques. Il fut décidé de réunir des représentants du secteur nucléaire le 8 mai 2000 pour leur demander avis et conseils. La lettre d'invitation est présentée dans le paragraphe suivant.

Lettre d'invitation aux représentants du secteur nucléaire pour la réunion consultative du 8 mai 2000

Monsieur le..., cher...

Concerne : formation post-graduée en génie nucléaire.

Depuis plusieurs années, comme vous le savez, les Universités belges, tant flamandes que francophones ont rationalisé leur offre de formation en génie nucléaire. La brochure annexée présente les programmes actuels sous une forme qui favorise les échanges bi-communautaires.

Les responsables de ces programmes s'interrogent toutefois sur l'évolution à donner à ceux-ci pour répondre aux besoins belges et s'inscrire dans la dynamique européenne. Une solution possible est décrite dans la communication ci-annexée présentée lors d'une réunion organisée par l'OCDE.

Avant d'engager un processus de concertation au niveau européen, mes collègues et moi-même souhaiterions vous rencontrer à l'occasion d'une réunion industrie-université qui aurait pour objet de mieux préciser la demande intérieure belge. C'est pourquoi, j'ai l'honneur de vous inviter à une réunion qui se tiendra :

Le lundi 8 mai de 14h à 16h au siège du SCK•CEN,

Avenue Herrmann-Debroux 40-42 à 1060 Bruxelles.

En espérant vous rencontrer à cette occasion, je vous prie d'agréer, Monsieur le..., cher..., l'expression de mes sentiments les meilleurs.

Signature

2 annexes

Une dizaine de représentants du secteur acceptèrent l'invitation. On leur présenta l'idée du regroupement en un seul programme qui serait localisé à Mol, enseigné en anglais, et on leur demanda s'ils préféraient cette solution à l'abandon progressif des formations en Belgique, qui les aurait conduits à envoyer leurs jeunes ingénieurs se spécialiser à l'étranger. On leur indiqua aussi que l'option du regroupement nécessiterait un soutien financier de leur part. L'option belge recueillit leur préférence pour autant nous dit-on « que le coût demeurât compétitif ». Il fut donc décidé de préparer le budget de cette option.

Les négociations commencèrent entre les universités et furent longues. Nos collègues de Mons nous informèrent de l'impossibilité pour leur faculté de contribuer à cette nouvelle formation par manque de renouvellement du corps professoral dans le domaine concerné, précisément l'un des problèmes que nous voulions anticiper ! Ceci fut confirmé au moment de la signature de l'accord de partenariat par lettre du recteur Serge Boucher. En revanche, nos collègues de la VUB souhaitèrent s'associer au nouveau programme, réalisant ainsi un vœu qu'ils n'avaient pu concrétiser dans le GGS.

Le groupe de travail se réunit de nombreuses fois : il fallait s'accorder sur les détails du programme et le partage des matières entre les différentes institutions ; Il fallait aussi jongler avec les règlements des uns et des autres, les décrets du Nord et du Sud, avec l'aide de spécialistes juridiques. La localisation de l'enseignement en dehors des universités mêmes constituait un point particulièrement délicat pour tous : aucun de nous n'avait l'expérience de la mobilité des professeurs. Nous étions plus habitués à la mobilité des étudiants. En outre, nos collègues de l'ULB se heurtaient à une difficulté particulière : comme cette institution propose une option nucléaire importante dans son programme d'ingénieur civil physicien, elle aurait été amenée à dédoubler certains cours pour participer à l'initiative commune. Compte tenu de contraintes internes, la chose paraissait impossible : au terme des négociations, nos collègues de l'ULB nous informèrent qu'ils ne pouvaient s'engager dans la voie que nous souhaitions suivre.

Démarré en 2000, le processus aboutit à la signature du « consortium agreement » par les cinq recteurs et le président du SCK•CEN en juillet 2002. Le consortium lui-même reçut le nom de BNEN (*Belgian Nuclear Higher Education Network*). Le comité directeur fut formé peu de temps avant la rentrée d'octobre 2002. Il comprenait les prof. Walter Bogaerts (KULeuven), William D'haeseleer (KULeuven), Michel Giot (UCL), Paul Govaerts (SCK•CEN), Alex Hermanne (VUB), Jacqueline Lecomte-Beckers (ULg), Philippe Mathieu (ULg), Ernest Mund (UCL), Hubert Thierens (UGent), Jean Vereecken (VUB), Fernand Vanmassenhove (UGent), ainsi que Frans Moons (SCK•CEN) qui joua très efficacement

pendant cinq ans le rôle de secrétaire académique. Le comité élut son premier président pour un terme de deux ans en la personne du prof. Michel Giot. L'ambition commune était la reconnaissance européenne du programme en tant que maîtrise (*Master of Science in Nuclear Engineering*).

Tableau 1 : Partage des charges académiques entre les universités partenaires de BNEN

	Total ECTS	KUL	UG	VUB	UCL	ULg
Nuclear energy : introduction	3	3				
Introduction to nuclear physics	3			3		
Nuclear reactor theory en experiments	8	2	3		3	
Nuclear thermal-hydraulics	6				6	
Operation and control	3		3			
Reliability and safety	3	3				
Nuclear fuel cycle, applied radiochemistry	3					3
Nuclear materials I	3					3
Nuclear materials II	3	3				
Rad. protection and nuclear measurements	6		4	2		
Selective advanced courses (coordination)	6					
Project and internship	13					
Total :	**60**					

L'un des résultats les plus significatifs de la préparation de BNEN a été la définition du contenu de base de la formation spécialisée en génie nucléaire. Ce contenu, présenté sous forme synthétique dans le tableau 1, sera validé ultérieurement au niveau européen comme on le verra au paragraphe 6. En utilisant la définition européenne de l'unité de mesure de la charge des étudiants, l'ECTS (*European Credit Transfer System*), une année académique complète représente 60 ECTS. Comme on le voit sur le tableau, le programme BNEN a réservé 10 % de cette charge à des cours dits avancés : séminaires et conférences sur des sujets d'actualité organisés spécialement pour les étudiants inscrits au programme ou dans un cadre plus large.

Les premières années de fonctionnement de BNEN se sont avérées fructueuses sur plusieurs points que nous allons analyser brièvement. Tout d'abord, la collaboration interuniversitaire et avec le SCK•CEN s'est inscrite dans une logique de recherche de la qualité non seulement pédagogique, mais aussi administrative : l'appui du Centre fut déterminante à cet égard. Le partage des charges d'un même cours entre des collègues, le recours systématique à des livres de référence en anglais,

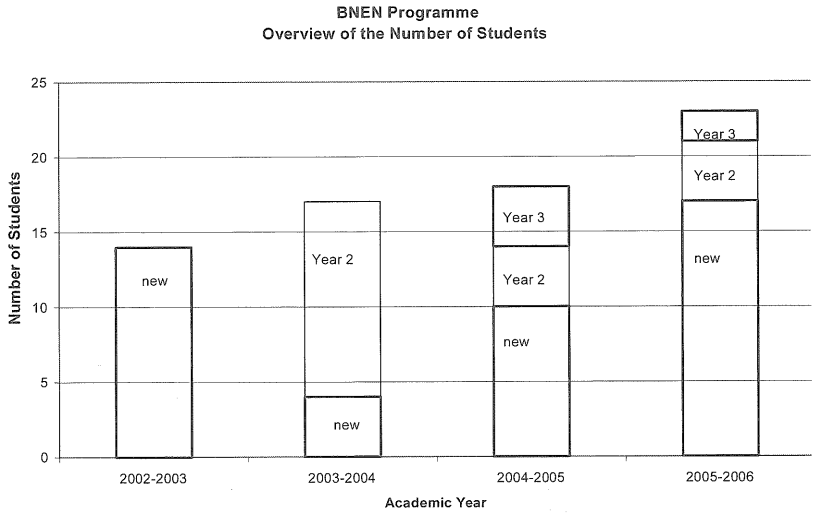
l'intervention de chercheurs du Centre dans l'encadrement des travaux pratiques, la gestion rigoureuse du programme par le comité directeur et le comité de l'enseignement, la concentration des enseignements sur des périodes courtes pour faciliter la participation des jeunes ingénieurs, ont été des facteurs incontestables de succès. Il faut toutefois noter que l'obligation d'adapter les délibérations du jury d'examen aux règlements des universités dans lesquelles les étudiants se sont inscrits ne constitue pas une simplification des procédures.

Photo 1 : Étudiants suivant le cours « Nuclear thermal-hydraulics » en 2002-2003



Il faut noter ensuite que le succès du programme va croissant comme le montre la figure 1 qui présente l'évolution du nombre d'étudiants inscrits. Dans cette figure, on montre aussi qu'aux nouvelles inscriptions s'ajoutent les deuxièmes et troisièmes années liées aux étalements des études des étudiants exerçant une activité professionnelle en parallèle avec ces études. En outre plusieurs cours de base ont été ouverts aux échanges Erasmus, donnant ainsi un caractère international aux auditoires. Enfin, certains cours avancés ont servi à la formation continue des ingénieurs du secteur nucléaire.

Figure 1 : Évolution du nombre d'étudiants inscrits au programme BNEN



Le succès de BNEN ne pouvait laisser les collègues de l'ULB indifférents. Une demande en bonne et due forme d'intégration au consortium a été acceptée en 2006 pendant la présidence du prof. William D'haeseleer. Dorénavant, l'ULB prendra en charge l'organisation des cours avancés, permettant ainsi au consortium d'élargir son choix de cours.

Au terme de quatre ans de fonctionnement, le programme a fait l'objet d'une évaluation interne et externe de grande envergure à l'occasion d'un projet du sixième Programme cadre de la Commission européenne. Cette opération visant à mettre au point une méthodologie d'évaluation de programmes interuniversitaires utilisable au niveau européen a fourni l'occasion d'une réflexion en profondeur sur tous les aspects de BNEN, réflexion menée en parfaite entente collégiale entre les différents acteurs du programme. Cette volonté de poursuivre l'œuvre entreprise sera bien nécessaire pour faire face aux difficultés administratives : les nouveaux décrets organisant l'enseignement supérieur dans les deux Communautés imposent en effet de mettre à jour l'accord de consortium. Organiser une formation qui fédère les Communautés autour d'un objectif commun relève malheureusement du parcours du combattant. Quant aux universités, on a pu constater qu'elles soutenaient leur projet commun puisqu'elles ont recruté de nouveaux académiques à temps plein et à temps partiel au prorata des départs des anciens. Les partenaires du secteur nucléaire continuent de leur côté à fournir le complément financier indis-

pensable à la poursuite des opérations. Est-il permis de rêver à un appui des pouvoirs publics pour renforcer la position internationale du programme ?

IV. La formation d'ingénieur industriel

Partout en Europe, on constate au cours des années 1990 un déclin de l'intérêt des étudiants pour les formations en ingénierie nucléaire et les Instituts supérieurs industriels ne font exception. Dès le milieu des années 1980, une adaptation est faite pour tenter de gommer quelque peu l'intitulé « Énergie nucléaire » prévu en 1977 pour ces spécialités du second cycle, intitulé devenu plus dissuasif qu'attractif. Ainsi, à Mol (IHRH) sont créées, à côté de la chimie nucléaire, les options « techniques nucléaires » et « techniques nucléaires médicales ». À Bruxelles (ISIB) une option « métrologie nucléaire » est organisée en parallèle avec les options « énergie » et « chimie nucléaire ». Seule la section organisée à Liège (Institut Gramme) maintient tel quel l'intitulé « énergie nucléaire » durant les années 1990. La diversification des formations correspond à l'espoir, partiellement vérifié, d'enrayer la baisse du nombre d'étudiants en faisant apparaître plus clairement d'autres débouchés que ceux du secteur énergétique. Elle répond aussi aux besoins croissants de ces autres secteurs, en particulier pour la radioprotection et les applications médicales. Mais elle est lourde pour les enseignants, dans un contexte peu favorable aux recrutements : à eux d'assumer l'ouverture à de nouveaux créneaux spécialisés.

Cette première diversification ne suffira pas. En 1992, la section de Mol (qui déménage vers Hasselt en 1995 puis vers le campus de Diepenbeek en 2000) élargit l'objet de la chimie nucléaire en « technologie environnementale et radiochimie » tout en rabotant fortement son contenu nucléaire. À Bruxelles et Liège, la déclaration gouvernementale de 1999, annonçant l'abandon des centrales nucléaires, amène les responsables à s'accorder pour un changement de programme et de dénomination, la section désormais nommée « génies physique et nucléaire » s'ouvrant plus largement à d'autres volets de la physique appliquée au prix d'une compression du volume des cours à caractère spécifiquement nucléaire. À l'ISIB, cette réforme est rapidement suivie du regroupement des trois orientations qui avaient subsisté jusque là : c'est la fin de la formation en chimie nucléaire du côté francophone. À Gramme, l'organisation de la section est finalement suspendue en 2004. Cette contraction de l'offre de formation s'accompagne bien entendu d'une réduction graduelle du personnel compétent dans le domaine nucléaire. Ainsi, en 2005, l'offre de formation nucléaire qui subsiste du côté francophone est-elle nettement réduite par rapport à 1990. Si les formations flamandes ont mieux résisté, elles ont cependant aussi connu une érosion du volume horaire des cours

spécifiquement nucléaires, surtout en chimie nucléaire. Mais globalement, les formations d'ingénieur industriel « nucléaire » ont mieux survécu que les formations universitaires, réussissant à sauver l'essentiel.

Entre-temps, les instituts ont été obligés d'intégrer, au milieu des années 1990, des ensembles plus vastes, les Hautes Écoles (XIOS-Hogeschool Limburg pour l'IHRH, HE Spaak pour l'ISIB, HEMES pour Gramme), qui comprennent également des instituts de finalité non technique ainsi que des instituts de type court. Cette réforme s'est généralement traduite par moins d'autonomie et par la nécessité pour l'enseignement de type long (2 cycles) de constamment défendre ses spécificités et en particulier son niveau universitaire, vis-à-vis du type court.

Une autre vague d'adaptation est finalement imposée par l'harmonisation européenne (dite « de Bologne ») qui s'achèvera en 2008. Le passage à cinq ans des études d'ingénieur industriel, du côté francophone, devrait permettre à Bruxelles un modeste réajustement des programmes en faveur de la spécialité nucléaire. L'organisation d'une cinquième année est encore en discussion du côté néerlandophone et pourrait également offrir une opportunité de renforcer la formation de cette spécialité. Le tableau qui suit donne une synthèse schématisée des programmes de cours prévus pour les années de spécialisation (3e Bachelier + Master) en crédit ECTS. Par souci de concision, seuls les cours spécifiques de la formation nucléaire sont détaillés.

Tableau 2 : Cours spécifiques de la formation nucléaire dans les ISI

XIOS-HL	ECTS	ISIB	ECTS
Formation générale d'ingénieur	9	Formation générale d'ingénieur	42
Socio-économie	8	Socio-économie / langues	14
Sécurité	4	Mathématiques	6
Projets	20	Physique générale et appliquée, Chimie physique	14
Radioprotection	6	Physique et applications des radiations, radioprotection	12
Physique nucléaire	7	Physique nucléaire	6
Chimie nucléaire	6	Chimie nucléaire	3
Mesures nucléaires	4	Mesures nucléaires	4
Orientation chimie nucléaire / environnement		Physique médicale / accélérateurs	5
Chimie/Environnement	50	Matériaux, matériaux nucléaires	10
Chimie nucléaire	6	Réacteurs nucléaires	7
Orientations technologie nucléaire et technologie nucléaire médicale : cours communs		Projets et stages	52
Électronique/Informatique	21	Options	5
Physique nucléaire	9		

Applications nucléaires médicales	4		
Électronique nucléaire	9		
Traitement d'images	4		
Orientation technologie nucléaire			
Énergie nucléaire	9		
Orientation technologie nucléaire médicale			
Dosimétrie médicale	9		

Dans ce contexte un peu chahuté où se sont succédées réformes et adaptations de programmes, le nombre d'étudiants a subi une érosion, très marquée du côté francophone après 2000. Le tableau qui suit indique le nombre total de diplômés d'orientation nucléaire pour les années 1991-1995, 1996-2000, 2001-2005. Le nombre d'enseignants de spécialité nucléaire est également limité : en 2005, cinq personnes à Bruxelles, et cinq à Diepenbeek, ayant par ailleurs pour la plupart à assumer divers cours généraux en plus des cours de la spécialité.

Tableau 3 : Nombre total de diplômes d'orientation nucléaire

	XIOS-HL	ISIB	Gramme
1991-1995	82	58	56
1996-2000	60	69	45
2001-2005	60	24	25

Ces nombres d'étudiants et d'enseignants montrent que la situation de ces sections reste précaire. Pour mieux assurer leur survie, et préparer leur renouveau, les services nucléaires des deux instituts ont suivi des stratégies fort parallèles, qui ont d'ailleurs favorisé leur collaboration mutuelle. Ces stratégies s'orientent vers

- le développement d'activités de recherche appliquée ;
- le développement de formations complémentaires courtes ;
- le développement de coopérations européennes ;
- le développement des coopérations avec les universités belges.

Bien que répondant à diverses sollicitations des pouvoirs publics régionaux, fédéraux et européens, ces développements ne sont guère accompagnés d'une redistribution des tâches au sein des instituts. Pour les petits groupes d'enseignants « nucléaires » qui s'y sont fortement impliqués, ils signifient un effort considérable s'ajoutant à leurs tâches initiales.

A. Recherche appliquée

Au départ d'une situation où la recherche était peu présente dans les Instituts supérieurs industriels, la volonté de quelques-uns a été d'affirmer le niveau universitaire des instituts en développant des activités de R&D directement tournées vers les besoins directs des entreprises et de la

société. Un des facteurs qui a permis cette éclosion de la recherche a été l'accès au financement régional de la recherche appliquée, ainsi que la participation à des projets belges ou européens. Toutefois, le financement de la recherche reste globalement plus difficile que pour les universités.

À Diepenbeek, l'accent est mis sur les questions de radioprotection dans l'industrie non nucléaire, et sur des applications médicales des radiations (dosimétrie, assurance qualité, caméra CT/PET). En 2005, deux chercheurs sont employés sur ces programmes, en plus du groupe de quatre enseignants-chercheurs impliqués dans les projets nucléaires du NuTeC, *Nuclear Technological Center*. À Bruxelles, les travaux portent sur la pollution par le radon, l'archéométrie, la simulation et le développement de méthodes de mesure des radiations et de traceurs radioactifs. En 2005, une chercheuse appuie les trois enseignants-chercheurs du groupe. Ces activités de R&D impliquent diverses coopérations académiques et industrielles, nationales et internationales.

B. Formations complémentaires

XIOS-HL et ISIB sont en contact étroit pour organiser en parallèle dans les deux langues nationales la formation des experts en radioprotection prévue par l'arrêté royal du 20/7/2001, en collaboration avec le SCK•CEN et l'IRE. Les deux instituts proposent aussi la formation en radioprotection des infirmier(e)s et technologues médicaux prévue par cet arrêté. D'autres formations sont organisées à la demande pour les entreprises.

C. Coopérations européennes

Au départ d'échanges d'étudiants dans le programme Erasmus, d'autres activités de coopération européenne pour l'enseignement ont été développées. L'ISIB et XIOS-HL collaborent avec trois autres partenaires européens dans l'organisation du cours intensif SPERANSA (*Stimulation of Practical Expertise in Radiological and Nuclear Safety*) et ont joué un rôle moteur dans la constitution en 2005 du réseau européen CHERNE (*Cooperation in Higher Education on Radiological and Nuclear Engineering*).

D. Coopération avec les universités belges

L'évolution graduelle de l'enseignement supérieur belge vers de plus grands ensembles conduit naturellement au développement de coopérations avec les universités belges, pour l'enseignement comme pour la recherche. Pour la période considérée, on note des collaborations de XIOS-HL avec la VUB et l'UHasselt, et des collaborations entre l'ISIB et l'ULB, la FPMs, l'ERM et l'ULg.

Le point fort des deux instituts XIOS-HL et ISIB reste cependant la qualité de leurs relations avec les entreprises et le milieu professionnel, qui permet en particulier l'organisation efficace de stages d'étudiants et de travaux de fin d'études réalisés sur des sujets d'intérêt concret pour l'entreprise. Ils maintiennent aussi des liens étroits avec les autorités compétentes et les sociétés scientifiques actives dans les domaines nucléaire et radiologique.

Fin 2005, alors que l'on note un très net regain des embauches dans le secteur nucléaire et que le renouveau industriel de ce secteur s'annonce, les sections formant des ingénieurs industriels dans ce domaine ont donc accumulé des atouts leur permettant de jouer un rôle important dans l'effort de formation indispensable aux secteurs nucléaire et radiologique.

V. La formation continue

A. Introduction

Dans la société technologique à évolution rapide que nous connaissons, nous sommes confrontés à de grandes quantités de données et à de nouvelles connaissances qui nous parviennent de façon incohérente et fragmentaire. La formation continue constitue le moyen privilégié pour structurer ces données et ces connaissances.

C'est le cas des différents domaines d'applications des rayonnements ionisants. L'industrie nucléaire, les applications médicales, le secteur non nucléaire et la problématique NORM (*Naturally Occurring Radioactive Materials* / Matériaux Naturellement Radioactifs) se caractérisent par un renouvellement perpétuel des techniques et des applications. Par voie de conséquence, la formation initiale des employés ne suffit plus ; la formation continue est devenue indispensable pour actualiser les connaissances des employés de tous niveaux et garantir des conditions de travail sûres. Dans le cadre de ce dernier point, la législation prévoit d'ailleurs un certain nombre d'obligations concernant la formation permanente.

Les paragraphes qui suivent traitent de l'organisation de la formation continue dans un domaine d'applications spécifique des rayonnements ionisants, à savoir le secteur nucléaire.

B. Exigences légales

L'arrêté royal du 20 juillet 2001, qui constitue la révision du règlement général pour la protection contre les rayonnements ionisants (ARBIS), contient plusieurs articles qui citent la formation (continue) des travailleurs. Celle-ci concerne l'article 25 relatif à l'information des travailleurs, des élèves, des étudiants et des personnes qui peuvent être exposées à un rayonnement ionisant et l'article 73 qui traite de la reconnaissance des

experts compétents en contrôle physique. Cet article constitue aussi une mise en œuvre de la directive européenne 96/26/EURATOM[1] qui définit et décrit les tâches de l'expert qualifié, ainsi que de la communication 98/C 133/03[2] de la Commission en ce qui concerne la mise en œuvre de cette directive.

L'article 25 prescrit que l'exploitant est responsable de l'information des travailleurs qui peuvent être exposés aux rayonnements ionisants, et ceci dès avant leur mise au travail. L'article précise le sujet de cette information qui doit être mise à disposition des travailleurs par écrit, et doit être répétée « en fonction des besoins, et au moins une fois par an ». En outre, l'exploitant doit prévoir une formation suffisante et adaptée pour chaque travailleur, qui soit spécialement adaptée à son poste de travail ou à sa fonction, et qui concerne l'emploi d'appareils et de matières qui émettent des rayonnements ionisants.

L'article 73 décrit les conditions auxquelles doit satisfaire l'expert pour pouvoir être agréé par l'Agence fédérale de contrôle nucléaire (AFCN-FANC). En plus de la possession d'un diplôme initial dans les sciences de l'ingénieur, ou de licencié en physique ou en chimie (pour les experts compétents pour le contrôle physique de classe I), ou d'ingénieur industriel (classe II), une des conditions porte sur le suivi d'une formation en radioprotection. Cette formation doit être de niveau académique, comporter au minimum 120 heures et porter sur la physique nucléaire, la physique des rayonnements, la radiochimie, les mesures nucléaires, la dosimétrie pratique, la radiobiologie et les principes de base de la radioprotection, ainsi que la pratique de la radioprotection y compris la réglementation et la législation nationale et européenne. Ainsi, une partie pratique doit être organisée, et l'expert doit subir avec succès un test de connaissances. La reconnaissance est accordée pour une durée déterminée. Lors d'une demande de prolongation, l'expert doit fournir la preuve qu'il maintient à niveau et continue à développer ses connaissances et ses compétences, aussi en ce qui concerne la radioprotection, dans le cadre de la formation permanente de niveau universitaire.

Les innovations reprises dans l'arrêté royal s'appuient partiellement sur les recommandations de l'Association belge de radioprotection (ABR-BVS). Le groupe de travail 'réglementation' de l'ABR-BVS avait émis en 1998 des avis visant à mieux formaliser les exigences de formation des experts. À la mi 2003, le bureau de l'Association a conclu à la nécessité

---

1 Council Directive 96/29/Euratom of 13 May 1996 laying down basic safety standards for the protection of the health of workers and the general public against the dangers arising from ionising radiation.

2 Communication from the Commission concerning the implementation of Council Directive 96/29/Euratom (98/C133/03), 2003.

de réanimer le groupe de travail afin d'aider à éliminer les imprécisions qui subsistaient dans l'interprétation de la nouvelle définition légale de la formation et de la reconnaissance des experts, et de mieux concrétiser les exigences au sujet de la formation continue des experts. Tout ceci à la demande de l'AFCN-FANC. Les discussions du groupe de travail se sont centrées sur la formation des experts compétents pour le contrôle physique, tant la formation initiale que l'expérience nécessaire, la formation continue et les dispositions transitoires résultat du changement de législation. Ce rapport[3] a été présenté dans le cadre plus large de la conférence ETRAP2005[4].

C. Organisation pratique

On trouvera dans le rapport[5] une vue d'ensemble des formations offertes en Belgique et destinées aux experts en contrôle physique. Jusqu'en 2003, il n'existait en fait aucune formation qui satisfasse aux exigences légales. Bien qu'un expert ne soit pas obligé de suivre la formation mentionnée à l'article 73 dans un seul et même établissement d'enseignement, XIOS Hogeschool Limburg (Diepenbeek), la Haute École P.-H. Spaak ISIB (Bruxelles), l'IRE et le SCK•CEN ont décidé d'organiser ensemble une nouvelle formation qui réponde complètement au prescrit légal. Depuis 2003, cette « formation pour expert en rayonnement » est organisée annuellement en néerlandais par XIOS et le SCK•CEN, et en français par l'ISIB et l'IRE. Le programme offre une occasion d'approfondissement des connaissances en radioprotection aux personnes actives dans le secteur nucléaire, dans le secteur radiologique (en ce compris le secteur de la médecine nucléaire) et dans l'industrie non nucléaire, et il est également ouvert à ceux qui n'ont pas directement en vue l'obtention d'une reconnaissance comme expert. Pendant les quatre premières années, cette formation a été suivie par environ nonante étudiants ayant des formations initiales et des environnements de travail divers.

Selon l'article 25 de l'arrêté royal de juillet 2001, l'information et la formation des travailleurs incombent à l'exploitant. Celui-ci peut assurer la formation lui-même, ou faire appel à un centre de formation spécialisé. La législation n'est heureusement pas le seul facteur qui motive l'exploitant pour fournir une information suffisante et un recyclage permanent. L'école internationale de protection radiologique (isRP) du SCK•CEN

---

3 ABR-BVS, « Verslag van de werkgroep 'regelgeving' aan het Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle. Erkenningsvoorwaarden voor deskundigen bevoegd in de fysische controle », 2004.

4 M. Coeck *et al.*, « The qualified expert : competences, training and experience requirements », proceedings of the ETRAP2005 conference, ISBN 9076971110, 2006.

5 Janssens *et al.*, « Education and training of the radiation expert in Belgium », proceedings of the ETRAP2005 conference, ISBN 9076971110, 2006

assure régulièrement des formations qui visent aussi bien la connaissance fondamentale des principes nucléaires et de la radioprotection que l'expertise nucléaire. Le programme est toujours adapté aux objectifs et aux connaissances de base des étudiants. À l'intérieur du secteur nucléaire, des entreprises telles que Electrabel, KC Doel, Belgonucleaire et Belgoprocess, et aussi l'AFCN-FANC et la Commission européenne font régulièrement appel à l'offre de cours de l'isRP du SCK•CEN. Le Centre dispose aussi d'un certain nombre de possibilités de formation dans d'autres domaines tels que la conduite des réacteurs, le démantèlement et les techniques relatives au traitement et au dépôt géologique des déchets. Le paragraphe suivant décrit plus en détail les différentes formations organisées par le SCK•CEN.

D. Formations nucléaires organisées par le SCK•CEN

Grâce à sa longue expérience dans le domaine des applications pacifiques des sciences et technologies nucléaires, le Centre d'étude de l'énergie nucléaire (SCK•CEN) s'est taillé une excellente réputation pas seulement pour la recherche, mais aussi pour l'enseignement et la formation pratique (en anglais *Education and Training ou E&T*). Les activités E&T du SCK•CEN concernent entre autres la physique des réacteurs, le fonctionnement des réacteurs, l'ingénierie des réacteurs, le démantèlement et la gestion des déchets. Ces cours sont destinés à l'industrie nucléaire, le secteur médical et l'industrie non nucléaire, les organismes publics nationaux et internationaux, le monde académique et le grand public. Comme on l'a indiqué plus haut, des programmes E&T sont aussi organisés avec les universités (BNEN, ENEN), les hautes écoles, les centrales nucléaires, et les services de santé publics et privés. En outre, le SCK•CEN est impliqué dans des réseaux et des programmes de recherche tels que ENETRAP, EUTERP, EUNDETRAF, CETRAD, etc.

Nous ne reviendrons plus ici sur le programme de « *master of nuclear engineering* » (BNEN). Mentionnons les autres activités E&T organisées à Mol :

1. Cours de physique des réacteurs nucléaires et de conduite des réacteurs pour opérateurs

La formation continue des opérateurs de centrales s'est avérée indispensable pour garantir le fonctionnement sûr des réacteurs actuels et futurs. Dans la plupart des pays, une telle formation répond aussi à une demande expresse des autorités de sûreté pour garantir le haut niveau de compétence du personnel des réacteurs nucléaires. Actuellement, le SCK•CEN organise un cours de statique et cinétique des réacteurs à Mol pour les opérateurs du réacteur BR2 et à Doel pour ceux de la centrale de Doel. Les leçons théoriques sont complétées par des séances de labora-

toire offertes au Centre sur les réacteurs de recherche BR1 et VENUS. On y organise aussi des cours pratiques à la demande pour les étudiants en génie nucléaire, d'universités belges et étrangères.

2. Cours de radioprotection

L'école internationale de protection radiologique (isRP du SCK•CEN) coordonne et organise des cours qui traitent de tous les aspects de la radioprotection. La série « fondements et connaissances de base » consiste en sept modules : physique nucléaire, interaction rayonnement – matière, mesures de rayonnements et de doses, effets biologiques, spectrométrie gamma, législation et ALARA, et culture de sûreté. Cette série fournit les connaissances théoriques et pratiques requises pour mettre en œuvre les aspects de radioprotection dans des environnements industriels ou médicaux, qu'il s'agisse de pratique quotidienne ou de gestion à long terme. En fonction de l'environnement de travail spécifique des étudiants, le programme d'études peut être complété par un ou plusieurs modules de la série « expertise nucléaire et radiologique » : entre autres radon et radioactivité naturelle, transport nucléaire, gestion sur site des accidents, organisation des plans d'urgence, radiochimie, aspects éthiques du risque radiologique, etc. Des exercices pratiques sont organisés sur site, et des visites des installations et laboratoires du SCK•CEN sont inclues. Le cours d'aspects éthiques de la protection radiologique, réalisé en collaboration avec le groupe PISA (*Programme of Integration of Social Aspects into nuclear research*) du SCK•CEN a été ajouté eu égard à l'importance croissante des aspects sociaux et éthiques de la radioactivité et de la technologie nucléaire.

3. VISIPLAN 3D, outil de planification ALARA

L'application du principe ALARA et l'évaluation des doses pour un travail à effectuer dans un environnement complexe sont des tâches compliquées. Les valeurs de doses, résultent en effet de la géométrie de l'installation, de la distribution des sources, de la configuration du blindage et de l'organisation du travail. L'outil de planification VISIPLAN 3D ALARA est un programme pour PC développé pour l'analyste ALARA ou la personne chargée de l'évaluation de la dose reçue par les travailleurs. Il permet d'évaluer les doses de rayonnements dans un environnement 3D et de comparer entre eux différents scénarios de travail. Un cours de trois jours explique les particularités du programme VISIPLAN.

4. Cours pratique de gestion de secours nucléaire

Les concepts de gestion de secours nucléaire hors site ont fait l'objet de révisions en profondeur après l'accident de Tchernobyl. Le SCK•CEN transmet son know-how dans ce domaine au moyen d'un cours pratique

européen d'une durée d'une semaine intitulé « *Preparedness and response for nuclear or radiological emergencies* ». Le cours a pour objectif de donner une vue aussi complète que possible de la gestion de secours hors site, ses principes et leur application pour les personnes impliquées dans les plans d'urgence, par exemple les responsables du contrôle physique, les conseillers techniques en radioprotection, les fonctionnaires de la protection civile et environnementale. Il couvre les principaux sujets suivants : principes d'intervention, évaluations radiologiques, techniques d'aide à la décision, et processus de prise de décision permettant d'optimiser les options de gestion. La dimension européenne et internationale du sujet est traitée (par exemple : législation communautaire, ECURIE et EURDEP). D'autres sujets comme les effets sur la santé, les conséquences économiques et les aspects psychosociaux sont également abordés.

5. Démantèlement des installations nucléaires

L'objectif du cours est de transmettre l'expérience et le know-how du démantèlement des installations nucléaires. Ce cours s'adresse aux responsables de projets de démantèlement, aux ingénieurs de sécurité, aux responsables de la santé, et aux opérateurs de décontamination et de démantèlement. Il peut aussi s'avérer intéressant pour les instances gouvernementales et de régulation impliquées dans le décommissionnement.

6. Cours pratique sur le dépôt géologique de déchets radioactifs

Des cours pratiques sur la gestion à long terme des déchets radioactifs sont offerts à la demande. Ces cours se focalisent sur l'option du dépôt géologique. Celle-ci requiert le choix et la caractérisation complète d'un site, la caractérisation des colis de déchets, et finalement la démonstration de la sûreté à long terme grâce à l'évaluation de performances et de sûreté. Les cours durent habituellement de une à deux semaines, et comprennent des exercices de calculs sur ordinateur, des ateliers et des visites de sites. Ils sont destinés à des personnes chargées de contrôle et de direction dans les agences de déchets ou les organismes de contrôle, ou encore pour des experts techniques qui effectuent la caractérisation d'un site nouveau ou existant, ou qui caractérisent des colis de déchets ou préparent des évaluations après fermeture.

Tous les enseignements dont question dans cette section sont adaptés aux besoins particuliers des étudiants et peuvent s'insérer dans un grand programme modulaire. Les cours sont donnés en français, en néerlandais ou en anglais dans le Centre de Conférences bien équipé du SCK•CEN ou chez le client. Les réacteurs BR1 et VENUS sont ouverts aux étudiants belges et étrangers. Les équipes enseignantes sont multidisciplinaires et comprennent des chercheurs chevronnés du Centre d'étude de l'énergie nucléaire.

VI. L'harmonisation européenne et la mobilité

Comme pour BNEN, l'histoire de la coopération européenne en matière de formation universitaire en génie nucléaire commence par une réunion, celle du 5 juin 2000, à l'invitation du noyau de fondateurs de BNEN, au siège du SCK•CEN (voir copie du programme encartée ci-après). Conforté dans leur démarche par les représentants du secteur nucléaire belge, ce noyau des fondateurs de BNEN était en effet à la recherche d'ouverture européenne. L'idée de concentrer la formation en génie nucléaire en quelques centres nationaux échangeant entre eux étudiants et professeurs en fonction des points forts de la recherche et de l'enseignement fut accueillie avec sympathie et les discussions aboutirent à la décision de préparer ensemble un projet à soumettre à la Commission européenne.

Le programme de la réunion tenu au 5 juin 2000 était le suivant :

European Network of Nuclear Engineering Education
Brussels, June 5, 2000
Programme
Morning session : "Express a strategic vision"
(Chairman : William D'haeseleer, KUL-Belgium)

9h00 Welcome by Paul Govaerts, Director General SCK•CEN
9h15 Introduction to this meeting, by Michel Giot, UCL-Belgium
9h30 Point of view from the Czech Republic, by Stanislas Vejvoda, TU Brno
9h45 Point of view from Finland, by Rainer Salomaa, TU Helsinki
10h00 Point of view from France, by Alain Gladieux, INSTN-Saclay
10h15 Point of view from Germany, by Klaus Wolfert, TU München
10h30 Point of view from Hungary, by Gabor Por, TU Budapest
10h45 Coffee break
11h00 Point of view from Italy, by Bruno Panella, Politecnico Torino
11h15 Point of view from The Netherlands, by Hugo van Dam, TU Delft
11h30 Point of view from Slovenia, by Borut Mavko, IJS Ljubljana
11h45 Point of view from Spain, by Agustin Alonso Santos, TU Madrid
12h00 Point of view from Sweden, by Raj Seghal, RIT Stockholm
12h15 Point of view from the United Kingdom, by David Weaver, U Birmingham
12h30 Comments and suggestions on behalf of the European Commission, by Georges Van Goethem
13h00 Lunch offered by SCK•CEN
Afternoon session : "Make a project"

(Chairman : Michel Giot, UCL-Belgium)

14h20 Introduction, by William D'haeseleer, KUL-Belgium

14h40 Discussion : Objectives and possible major characteristics of a European Network of Nuclear Engineering Education

15h20 Discussion : Sequence of steps to prepare the project

15h50 Discussion : Requests for funds

16h10 Conclusion by Frans Moons, Scientific Co-ordinator SCK•CEN

16h20 End of the meeting

Le projet reçut le nom de ENEN (*European Network of Nuclear Engineering Education*) et démarra en janvier 2001. Il déboucha sur une coopération européenne durable. Mais, cela c'est une autre histoire, celle du nucléaire en Europe.

La recherche universitaire

Paul-Henri HEENEN

Professeur à l'ULB

I. Introduction

L'Institut interuniversitaire des sciences nucléaires (IISN/IIKW) et le Fonds national de la recherche scientifique (FNRS/FWO) ont joué un rôle essentiel dans le développement des activités de recherche en physique subatomique, traditionnellement divisée en physique des hautes énergies et des basses énergies. La première appellation regroupe les activités liées à la physique des particules et aux théories d'unification des interactions fondamentales, la seconde concerne la physique nucléaire. La frontière entre ces domaines n'est pas étanche, certaines recherches se trouvant présentes dans les deux, comme la physique du neutrino ou l'astrophysique.

Ces domaines de recherches sont également fortement structurés au niveau européen. L'ECFA (*European Committee for Future Accelerators*) pour la physique des particules a pour principale fonction de planifier les grands investissements en matière d'accélérateurs de haute énergie. Le CERN y joue naturellement un rôle essentiel. Le NuPECC (*Nuclear Physics European Collaboration Committee*) pour la physique nucléaire de même que l'ApPEC (*Astroparticle Physics European coordination*) pour la physique des astro-particules sont de création plus récente (1989 et 2000 respectivement). Ces organismes ont également pour but de coordonner le développement des grands centres de recherche européens dans leurs domaines respectifs et de définir les axes de recherches privilégiés. La recherche belge s'inscrit naturellement dans le cadre des priorités définies par ces organismes et est solidement ancrée dans les grands programmes de recherche financés par l'Europe. Les quelques pages qui suivent ont pour but principal de montrer que malgré la petite dimension des universités belges, les équipes de physique des particules et de physique nucléaire, en se regroupant et en développant des programmes bien ciblés, sont parvenues à acquérir une reconnaissance et une visibilité internationale enviables.

Le court résumé des principales activités dans les différents domaines qui est repris ci-dessous est largement inspiré de rapports publiés en 2005 dans la revue *Physicalia Magazine* et rédigés par D. Bertrand et C. De Clercq (Hautes énergies, ULB et VUB) et par K. Heyde (Basses énergies, UGent) et des informations se trouvant sur les sites web des groupes impliqués.

II. Physique des hautes énergies

Grâce à l'IISN, la Belgique a été présente au CERN dès le démarrage des activités de celui-ci.

Très rapidement s'est établie une collaboration entre les laboratoires de plusieurs universités des deux Communautés, collaboration qui est toujours en cours aujourd'hui. Le laboratoire bruxellois de l'IIHE (Institut interuniversitaire des hautes énergies) est d'ailleurs un des derniers laboratoires belges communs à des universités des deux rôles linguistiques, l'ULB et la VUB. Créé dans les années 1970 par J. Sacton et J. Lemonne, il reste un des points d'ancrage essentiel de l'activité belge au CERN.

La recherche expérimentale en physique des hautes énergies en Belgique a suivi de près les grandes évolutions de la recherche internationale dans le domaine. Aujourd'hui, les expériences sont principalement réalisées, dans le cadre de grandes collaborations à l'échelle mondiale auprès des deux grands laboratoires européens : le CERN à Genève et DESY à Hambourg. L'astrophysique des neutrinos est une activité nouvelle en plein essor qui occupe une place à part mais fait également appel à de grandes collaborations internationales incluant des pays non européens.

Les interactions profondément inélastiques d'électrons ou de positrons avec des protons de très haute énergie sont étudiées auprès du collisionneur HERA à DESY dans le cadre de trois collaborations internationales auxquelles participent des Universités belges. HERMES, à laquelle participent des chercheurs de la UGent, a pour but d'étudier la structure en spin du nucléon. Les expériences H1 (UA, ULB et VUB) et Zeus (UCL) cherchent à comprendre la structure interne du proton dans le cadre de la théorie de la chromodynamique quantique.

Durant les années 1990, les équipes belges ont participé à deux des trois grandes expériences montées auprès du *Large Electron Positron collider* (LEP) du CERN : ALEPH (UCL) et DELPHI (UA, UMH, ULB et VUB), dont le but était de tester de manière précise les prédictions du Modèle Standard de la physique des particules et de certaines de ses extensions. Le LEP ayant été arrêté en 2000 pour permettre la construction du *Large Hadron Collider* (LHC) qui devrait être opérationnel en 2007. Le LHC a pour premier but de vérifier les théories proposées simultanément dans les années 1960 par Higgs et deux chercheurs de l'ULB,

R. Brout et F. Englert, qui postulent l'existence de particules massives à l'origine des masses des particules physiques. Les équipes belges se sont regroupées autour de l'expérience CMS (UA, UCL, UMH, ULB, VUB) qui sera en service dès le démarrage du LHC et dont la conception et la réalisation a demandé un travail de plus d'une décennie. Les difficultés techniques liées aux expériences sont gigantesques et constituent un défi particulièrement difficile à relever. Les équipes belges travaillent depuis plusieurs années sur plusieurs éléments des détecteurs de façon à pouvoir déceler dans la myriade de particules créées par les collisions à haute énergie celles qui sont intéressantes. Pour ne citer qu'un exemple, le détecteur CMS demande une sélection extrêmement rapide des événements intéressants alors que les faisceaux se croiseront à une fréquence de 40 MHz produisant à chaque fois une vingtaine d'interactions. Cette capacité de tri est indispensable si on ne veut pas noyer les dépouillements ultérieurs sous une masse ingérable d'événements. Elle nécessite des analyses multi-critères en ligne, qui posent à la fois des problèmes difficiles de physique et de traitement informatique.

La recherche théorique en physique des particules reste particulièrement active dans toutes les Universités francophones (ULB, UCL, UMH et ULg). Elle apporte un support important aux recherches expérimentales entreprises tant en Belgique qu'à l'étranger.

Les physiciens des particules ont également collaboré avec des physiciens soviétiques au CERN et à Serpukhov. En particulier, dans le cadre d'une collaboration qui a débuté en 1967 des physiciens de l'ULB ont conçu et développé des détecteurs (appelés GAMS) constitués de cellules en verre au plomb qui permettent à la fois de mesurer l'énergie de photons de haute énergie mais aussi de déterminer avec une grande précision le point d'impact des photons dans le détecteur. Les expériences effectuées à Serpukhov et au SPS du CERN ont permis de mettre en évidence de nouvelles voies de désintégrations des mésons connus et de proposer de nouveaux mésons, candidats boulle de glu, dont l'existence demeure une des pierres angulaires de la cohérence de la chromodynamique quantique comme théorie universelle des interactions fortes.

La recherche en physique des neutrinos couvre tous les aspects de cette physique, de la physique des particules à la physique nucléaire. Nous reviendrons plus loin sur les aspects plus spécifiquement reliés au noyau atomique. Les recherches en hautes énergies s'articulent autour de collaborations à l'échelle mondiale et de détecteurs de très grandes dimensions. Signalons en particulier, l'expérience AMANDA (*Antartic Muon And Neutrino Detector Array*) (ULB, VUB, UMH) qui utilise, enfouis dans les glaces de l'Antarctique, des tubes photomultiplicateurs de détection de signal. Une extension de cette expérience, dont le but est de déterminer les propriétés des neutrinos galactiques et extra galactiques

de très haute énergie (intervalle de 10^{12} à 10^{18} GeV), se prolongera dans les années à venir dans une expérience appelée *IceCube*, à laquelle participe également la UGent. Ces expériences devraient fournir des indications sur l'origine des rayons cosmiques de très haute énergie. Elles devraient également aider à éclaircir le problème de la matière noire et tester l'existence de particules super symétriques.

Les Universités belges ont été impliquées depuis très longtemps dans des expériences en physique du neutrino et plus spécifiquement, depuis une quinzaine d'années, dans la recherche de signaux d'oscillation de neutrinos. L'expérience CHORUS a été réalisée au CERN dans les années 1990 (UCL, ULB, VUB). L'ULB est impliquée dans un projet qui vient de démarrer et qui a lieu au Gran Sasso, en Italie à l'aide du détecteur OPERA. Dans ce laboratoire situé sous une épaisse couche montagneuse et donc (presque) à l'abri du bruit de fond cosmique et terrestre, sont détectés les neutrinos émis par l'accélérateur du CERN, situé à environ 700 km. Cette distance doit permettre aux oscillations entre les neutrinos muoniques et les neutrinos de type τ de se développer dans la gamme d'énergie de leur production au CERN.

Parallèlement à ces recherches expérimentales, plusieurs groupes belges ont atteint une renommée internationale de grande valeur en physique mathématique et en physique des particules théoriques. L'origine du groupe de Bruxelles est très ancienne et les recherches actuelles en théorie de grande unification, en particulier en théorie des cordes, menées par le laboratoire de physique mathématique des interactions fondamentales, peuvent être reliées aux recherches initiées par J. Géheniau dans l'immédiate après-guerre. Des groupes de la KULeuven et de la VUB ont également une activité importante en physique mathématique.

Cette recherche en physique des hautes énergies, bien organisée au niveau national, avec des groupes essentiellement complémentaires, a obtenu de nombreux crédits du gouvernement fédéral, en dehors des crédits alloués par le FNRS et l'IISN. En particulier, un Pôle d'attraction interuniversitaire (PAI) a réuni pour la période 2002-2006 les groupes de théoriciens de la KULeuven, l'UA, la VUB, l'ULB et l'UCL aux groupes d'expérimentateurs de l'ULB, la VUB, l'UCL, l'UA et l'UMH. Ce projet ambitieux d'études théoriques et expérimentales intégrées des interactions fondamentales a permis à la Belgique d'obtenir une visibilité internationale remarquable par rapport aux budgets alloués et à la taille de chacun des groupes.

L'analyse des résultats expérimentaux qui seront obtenus au LHC va poser des problèmes techniques gigantesques. En particulier, les besoins informatiques considérables qui seront nécessaires ont demandé la mise sur pied d'une initiative appelée GRID d'intégration de ressources informatiques géographiquement dispersée. Une fois encore, les groupes

belges (UA, UCL, ULB, UMH et VUB) prennent une part active dans le développement de ce système de calcul distribué. Un centre régional belge fédéré, financé par le FNRS/FWO et partagé entre l'UCL et l'ULB-VUB, sera créé en 2007 dans le cadre des grilles de calcul mises à disposition des expériences CMS (LHC) et *IceCube*.

D'après un rapport 2005 de l'ECFA, 28 chercheurs permanents et post doctoraux et 53 doctorants étaient actifs en physique des particules en 2005. Ces chiffres de l'ECFA concernent principalement les recherches expérimentales. Ils montrent une proportion très favorable entre le nombre de doctorants et le nombre de chercheurs confirmés.

III. Physique des basses énergies

Cette appellation recouvre la physique nucléaire fondamentale au sens large. L'étude des propriétés du noyau atomique a débuté dans les années 1950 dans les cinq grandes universités belges. M. de Hemptinne à l'UCL, J. Hoste à la UGent et P. Mariens à la KULeuven sont à l'origine du développement des groupes expérimentaux belges. L'ULB, sous la houlette de M. Demeur et l'ULg sous celle de J. Humblet se sont consacrées principalement à la physique nucléaire théorique. Enfin, le laboratoire SCK•CEN de MOL a joué un rôle important dans la formation des jeunes chercheurs en fournissant des possibilités de recherche expérimentales auprès du réacteur BR2.

La scission de l'Université de Louvain et la construction d'un nouveau cyclotron à Louvain-la-Neuve (LLN) sous la direction de P. Macq (CYCLONE 110) au début des années 1970 ont donné une impulsion importante à la physique nucléaire expérimentale en Belgique. Le CRC (Centre de recherches du cyclotron) s'est doté au cours des années 1984-1987 d'un petit cyclotron supplémentaire (CYCLONE 30) et plus récemment en 1999 du cyclotron CYCLONE 44, dédié à l'astrophysique. Cet ensemble de trois cyclotrons a été et est toujours utilisé par des équipes de l'UCL, de la KULeuven et de l'ULB mais également par de nombreux utilisateurs étrangers.

Depuis la fin des années 1980, la recherche auprès de ces cyclotrons a été un exemple remarquable de collaboration entre les physiciens expérimentateurs de l'UCL, de la KULeuven et de l'ULB et les groupes de théoriciens (physique nucléaire et astrophysique) de l'ULB et de la UGent. Cette recherche a été initiée par des chercheurs de l'ULB proposant l'étude de réactions nucléaires à très basse énergie dont l'intérêt premier était l'analyse de cycle de nucléosynthèse stellaire. Une telle étude demandait la production d'isotopes radioactifs et leur accélération ultérieure. Un programme ambitieux et novateur de production d'ions radioactifs à des fins d'astrophysique nucléaire a ainsi été proposé et a

reçu le soutien dès 1987 d'un PAI (Pôle d'attraction interuniversitaire) dont l'UCL était le coordinateur, les autres membres étant la KULeuven (physique expérimentale) et l'ULB (physique théorique et expérimentale). Ce PAI a abouti à une double première mondiale : la production d'un faisceau d'un ion à courte durée de vie, l'azote 13 (10 minutes), d'une intensité et d'une qualité suffisante pour réaliser des collisions à basse énergie et la mesure de la section efficace de la collision $^{13}N(p,\gamma)^{14}O$. Celle-ci joue un rôle critique dans le cycle CNO qui permet aux étoiles massives de brûler leur carbone et leur azote pour aboutir à l'oxygène 16. La valeur de cette section efficace utilisée dans les codes de combustion stellaire reposait précédemment uniquement sur des estimations théoriques. La collaboration entre expérimentateurs et théoriciens, spécialistes de la description des réactions entre noyaux légers et en astrophysique nucléaire a permis de valoriser de façon optimale les résultats obtenus dans le cadre de ce PAI.

De nombreux autres faisceaux de noyaux radioactifs ont été produits et accélérés par la suite, faisant du laboratoire de LLN un pionnier dans ce domaine. L'expérience technique acquise ainsi reste toujours très utile pour les grands projets de production de faisceaux radioactifs qui sont en cours de réalisation. Cet axe de recherche est actuellement à l'échelle mondiale, un des principaux axes de recherche en physique nucléaire. Le CRC est reconnu depuis 1996 comme « *European Large Scale Facility* »

Le PAI a par la suite évolué et est actuellement dirigé par l'équipe de la KULeuven, en regroupant l'UCL, l'ULB et le groupe de physique théorique de la UGent. Le cyclotron de LLN continue à y jouer un rôle important mais de nombreuses expériences sont réalisées auprès des grands accélérateurs européens, le GANIL (Caen, France), GSI (Darmstadt, Allemagne) et ISOLDE-CERN (Genève, Suisse). Les intérêts de cette collaboration se sont étendus à l'étude de l'ensemble des propriétés des noyaux éloignés de la stabilité, ce qui correspond bien aux développements théoriques effectués à la UGent et à l'ULB. Cette évolution est en harmonie avec les lignes stratégiques préconisées en physique nucléaire par le NUPECC, comité de coordination des efforts européens en physique nucléaire. Elle est en partie également liée au rôle majeur que la KULeuven joue à ISOLDE, P. Van Duppen ayant été le « *physics group leader* » de cette branche du CERN consacrée à la physique nucléaire durant les années 1993-1995 et M. Huyse en étant le président du comité d'expériences depuis 2005 et à ce titre, membre du Conseil Scientifique du CERN. L'une des contributions les plus fameuses du groupe de la KULeuven est liée à l'étude des isotopes du Plomb très déficients en neutrons. Ces physiciens ont en particulier montré les propriétés uniques du ^{186}Pb, seul noyau dont le fondamental et les deux premiers états excités, situés à basse énergie, ont des spins nuls et une parité positive. Une

telle propriété apporte des contraintes difficiles à satisfaire par les modèles théoriques actuels de structure nucléaire.

La KULeuven a également développé des méthodes de mesure des moments électromagnétiques des noyaux qui sont parmi les plus performantes au monde. Ces méthodes, introduites par R. Coussement au début des années 1980, utilisent des techniques alliant physique nucléaire et physique de la matière condensée. Leur principe est basé sur l'interaction d'un ensemble de noyaux dont le spin est orienté avec un champ magnétique statique et un champ électrique présentant un gradient induit par le cristal dans lequel les noyaux ont été implantés. Par les mélanges de niveaux nucléaires (« *nuclear level mixing* ») induits par ces champs, il est possible de remonter aux moments magnétiques et électriques des noyaux. Cette méthode est encore continuellement développée par les chercheurs de la KULeuven. Elle est particulièrement bien adaptée à l'étude des noyaux éloignés de la stabilité et est régulièrement utilisée dans les expériences menées auprès des grands accélérateurs de particules, en particulier le GANIL en France et GSI en Allemagne.

La physique des ions lourds née dans les années 1960 et développée à l'ULB et à l'UCL, a largement profité de l'acquis du détecteur franco-belge DEMON (Détecteur Modulaire de Neutrons). Une collaboration très ciblée entre l'UCL, l'ULB du côté belge et le LPC Caen et l'IRES de Strasbourg du côté français a démontré qu'il était possible de concevoir et de réaliser des détecteurs performants avec des moyens limités et de petites équipes. Cette collaboration a développé le détecteur DEMON pour l'étude des collisions profondément inélastiques entre deux noyaux. Ses performances remarquables ont amené son utilisation pour l'étude d'autres phénomènes, en particulier l'étude des réactions de synthèse de noyaux super-lourds à DUBNA, en Russie et les propriétés des noyaux exotiques légers riches en neutrons au GANIL.

Des études d'interactions faibles sont réalisées par des équipes de l'UCL et de la KULeuven en grande partie en collaboration. La méthode utilisée est basée sur l'orientation des spins nucléaires de noyaux plongés dans de très basses températures (de l'ordre du mK) et soumis à des champs magnétiques intenses. Les noyaux sont implantés dans un cristal de fer. L'un de ces appareillages était installé auprès de cyclone 110 à LLN, un autre l'est à ISOLDE, au CERN. Les expériences effectuées ont pour but de mettre en évidence dans la désintégration bêta de noyaux atomiques des effets qui ne peuvent pas être expliqués par le modèle standard. Cette recherche en interaction faible a connu une nouvelle extension récemment grâce au projet WITCH qui est commissionnée à ISOLDE. Son but est de mesurer les corrélations entre les neutrinos émis dans les désintégrations bêta d'isotopes radioactifs à courte durée de vie, piégés dans une trappe magnétique.

Plusieurs programmes actuels de physique nucléaire montrent combien la frontière entre recherche fondamentale et appliquée est peu étanche et que les deux domaines s'enrichissent mutuellement. Le CRC de LLN participe actuellement pour l'ESA à un programme européen de tests d'usure des matériaux soumis à un bombardement cosmique. Le cyclotron cyclone 110 est également utilisé pour mesurer des sections efficaces neutroniques nécessaires pour la conception de réacteurs nucléaires guidés par accélérateurs de protons ou ADS (*Accelerator Driven System*), dans le cadre de programmes français dirigés par le CEA et l'IN2P3. Ayant identifié l'existence de besoins importants et qui s'inscrivent dans la durée en matière de dispositifs d'irradiation par des neutrons à large spectre, des équipes du SCK•CEN Mol ont conçu une machine multifonctionnelle originale et fortement innovante répondant à l'acronyme de MYRRHA. Cette machine comprend aussi un accélérateur de protons de type avancé, pilotant un réacteur sous-critique ADS. Un grand programme européen (EUROTRANS) financé par la Commission a été lancé sur ce sujet. Les chercheurs belges, avec le projet MYRRHA, y jouent un rôle majeur.

Un développement plus inattendu est celui des codes de cascades intranucléaires conçus à l'ULg pour étudier l'absorption d'antiprotons par le noyau. En collaboration avec des chercheurs du CEA, ces codes sont actuellement adaptés pour décrire l'absorption de neutrons par des noyaux fissiles aux énergies d'intérêt pour les ADS.

D'après le recensement effectué par le NuPECC en 2006, la physique des basses énergies expérimentale occupe 20 chercheurs permanents, 24 post-doctoraux et 37 doctorants. En physique théorique, les chiffres sont respectivement de 18, 13 et 21. Ces chiffres sont relativement stables depuis une dizaine d'années. La proportion du nombre de doctorants par rapport à l'ensemble des postes est particulièrement satisfaisante.

Le Centre de recherches du cyclotron de l'UCL à Louvain-la-Neuve

Jean VERVIER

Professeur émérite à l'UCL

I. La période faste : 1990-1998

A. Recherches fondamentales en physique nucléaire

1. Les faisceaux d'ions radioactifs

Le début de la période 1990-1998 vit la réalisation d'une première mondiale : la première mesure directe de la section efficace d'une réaction nucléaire d'intérêt astrophysique mettant en jeu des noyaux radioactifs, la réaction de capture de protons par le noyau ^{13}N dont le temps de demi-vie est : $t_{1/2}$=10 minutes. Cette réaction est d'une importance cruciale pour la compréhension d'un phénomène stellaire relativement fréquent, une étoile « nova », au cours duquel une étoile voit son éclat augmenter brusquement, d'un facteur de 1000 à 10000, pour retomber, après quelques jours, à des valeurs beaucoup plus faibles. La mesure de Louvain-la-Neuve, réalisée en décembre 1990, a permis aux astrophysiciens de comprendre en détails le mécanisme de ces étoiles novae.

Cette expérience a été rendue possible grâce au développement, au Centre de recherches du cyclotron (CRC) de l'UCL à Louvain-la-Neuve, de *faisceaux d'ions radioactifs*, accélérés pour la première fois en juin 1989. Pour cela, le CRC disposait de 2 cyclotrons. L'un, CYCLONE 30, était le prototype des premiers cyclotrons construits et commercialisés par l'Entreprise *Ion Beam Applications* (IBA). Il produisait des faisceaux très intenses, jusqu'à 500 μA, de protons, lesquels, envoyés sur des cibles enrichies en ^{13}C, généraient de grandes quantités de noyaux ^{13}N par la réaction $^{13}C(p,n)^{13}N$. Le second cyclotron, CYCLONE 110, en service à Louvain-la-Neuve depuis 1972, accélérait les atomes ^{13}N ainsi produits et préalablement ionisés, et leur conférait l'énergie adéquate pour l'étude de

la réaction astrophysique ^{13}N(p, gamma)^{14}O. Cette méthode de production de faisceaux d'ions radioactifs, dite « *méthode des 2 accélérateurs* », a été mise en œuvre, pour la première fois au monde, à Louvain-la-Neuve en 1989, et le CRC a conservé, jusqu'en 1999, l'exclusivité mondiale de son utilisation.

Le développement de faisceaux d'ions radioactifs, et son utilisation pour des expériences d'intérêt astrophysique, ont été rendus possibles par une étroite collaboration interuniversitaire, dans le cadre d'un Pôle d'attraction interuniversitaire (PAI), soutenu financièrement par le Gouvernement fédéral belge durant de nombreuses années. Ce PAI a réuni des équipes : de l'Université catholique de Louvain (UCL) appartenant à l'Institut de physique nucléaire (FYNU) du département de physique et au Centre de recherches du cyclotron (CRC) ; de la Katholieke Universiteit Leuven (KULeuven), venant de l'Instituut voor Kern – en Stralingsfysika (IKS) ; de l'Université libre de Bruxelles (ULB), liées à l'Institut d'astronomie et d'astrophysique et au Service de physique nucléaire théorique et de physique mathématique. Cette mise en commun, au sein d'un PAI, des compétences des différents partenaires a permis les réalisations décrites plus haut, en termes de faisceaux d'ions radioactifs et de mesures d'astrophysique nucléaire.

Mais les membres de la collaboration PAI n'en sont pas restés à ces premières réalisations. Un troisième cyclotron, CYCLONE 44, a été construit et mis en service au CRC durant la phase 1992-1996 du programme des PAI, en vue d'accélérer des faisceaux d'ions radioactifs dans une gamme d'énergie, de 0,2 à 0,8 MeV par nucléon, mieux adaptée que CYCLONE 110 aux expériences d'intérêt astrophysique. Un séparateur de recul fut également assemblé au CRC, afin de détecter les produits des réactions nucléaires astrophysiques (par exemple ^{14}O pour la réaction ^{13}N(p, gamma)^{14}O) avec un très grand pouvoir discriminatoire. D'autres faisceaux d'ions radioactifs que ^{13}N ont été développés, avec des intensités élevées, par exemple ^{19}Ne, ^{18}F, ^{7}Be et bien d'autres. Ils furent utilisés, eux-aussi, pour mesurer des sections efficaces de réactions nucléaires d'intérêt astrophysique, telles ^{19}Ne(p, gamma)^{20}Na et ^{18}F(p, alpha)^{15}O (importantes dans les phénomènes stellaires de « sursauts X ») et bien d'autres.

L'accélération de faisceaux d'ions radioactifs et l'exclusivité mondiale dont disposait le CRC durant une dizaine d'années ont attiré à Louvain-la-Neuve un grand nombre de chercheurs étrangers, en particulier européens. En vue de favoriser ces contacts, le CRC a conclu, avec la Commission européenne, plusieurs Contrats d'accès successifs, lesquels ont financé les déplacements et les séjours de chercheurs de la Commission européenne venus mener des expériences auprès des faisceaux de Louvain-la-Neuve, ainsi que, en partie, les dépenses occasionnées par ces

chercheurs au CRC. Avec des scientifiques non européens, américains, canadiens, japonais, etc., la venue de centaines de physiciens européens a créé et entretenu, auprès des cyclotrons de Louvain-la-Neuve et durant une dizaine d'années, une vie scientifique extrêmement active et fructueuse.

2. Les faisceaux monocinétiques de neutrons rapides

Mais les faisceaux d'ions radioactifs n'étaient pas les seuls atouts des cyclotrons du CRC pour attirer, à Louvain-la-Neuve, des chercheurs du monde entier. Les *faisceaux monocinétiques de neutrons rapides*, dans la gamme d'énergie de 20 à 75 MeV, ont permis de réaliser des expériences liées au développement de l'énergie nucléaire de fission. Il s'est agi alors de mesurer les sections efficaces totales et différentielles de réactions nucléaires induites par ces neutrons rapides sur des matériaux utilisés, soit dans des réacteurs rapides critiques, soit dans des ensembles accélérateurs-réacteurs sous-critiques. Ces derniers sont notamment envisagés pour la transmutation des déchets nucléaires de longs temps de vie, par exemple dans le cadre du programme EUROTRANS de la Commission européenne. Le laboratoire de Louvain-la-Neuve a d'ailleurs été le coordinateur d'une Action concertée, soutenue financièrement par la Commission européenne, en vue de coordonner la mesure, dans divers laboratoires européens, de sections efficaces indispensables pour ces développements.

3. Les faisceaux d'ions lourds stables

Une troisième spécificité du CRC, moins unique que les faisceaux d'ions radioactifs et les faisceaux monocinétiques de neutrons rapides, fut la production, au moyen de CYCLONE 110, de faisceaux d'ions lourds stables, dans des gammes d'énergies complémentaires de celles couvertes par d'autres laboratoires européens, français, allemands, finlandais, hollandais et italiens. Ces faisceaux ont surtout été utilisés, en ce qui concerne la physique nucléaire « fondamentale », pour la production de noyaux très « exotiques » (loin de la stabilité nucléaire), en particulier par des équipes de la KULeuven, et pour l'étude des mécanismes des réactions nucléaires induites par ces ions lourds, et notamment au moyen du multidétecteur de neutrons rapides DEMON, développé en commun par des équipes belges et françaises et utilisé dans divers laboratoires européens dont le CRC.

Les développements et expériences décrites jusqu'ici concernaient surtout des recherches fondamentales en physique nucléaire, avec néanmoins une ouverture vers les applications de l'énergie nucléaire de fission. Mais les faisceaux des cyclotrons de Louvain-la-Neuve ont été également largement utilisés pour des applications en chimie nucléaire, en médecine nucléaire et en sciences appliquées.

B. Les applications en chimie et médecine nucléaire et en sciences appliquées

1. Chimie nucléaire

Les activités de chimie nucléaire se sont articulées autour de 3 directions : la production d'émetteurs de positrons au moyen de CYCLONE 110 puis de CYCLONE 30, et leur incorporation dans des molécules marquées en vue de leur utilisation pour la Tomographie par émission de positrons (TEP) décrite ci-dessous ; la production de noyaux radioactifs de temps de vie relativement longs, tels ^{18}F et ^{7}Be, au moyen de CYCLONE 30, et leur conditionnement en vue de leur post-accélération dans CYCLONE 44 et CYCLONE 110, pour la production de faisceaux d'ions radioactifs décrite plus haut ; la production, au moyen de CYCLONE 110, d'isotopes radioactifs à usage médical ou biologique, tels ^{56}Fe, ^{96}Tc et ^{123}I. Dans ce dernier cas, les applications médicales concernaient des radiodiagnostics ou le traitement du cancer de la mœlle épinière.

2. Applications en médecine nucléaire

Les applications des cyclotrons du CRC en médecine nucléaire ont concerné deux principaux domaines : la thérapie du cancer par des faisceaux de neutrons rapides, ou neutron-thérapie et par des faisceaux de protons, ou proton-thérapie, la Tomographie par émission de positrons (TEP).

a. La neutron-thérapie du cancer

La neutron-thérapie du cancer a débuté en 1978, après une période d'expériences sur le spectre et la dosimétrie des faisceaux de neutrons rapides, et sur leurs effets sur différents matériaux biologiques. De 1978 à 1999, plus de 2000 patients ont été soignés par cette méthode avec, au cours des 10 dernières années, un accent particulier sur le cancer de la prostate. Un développement majeur fut la réalisation, en 1991 par les ingénieurs du CRC, les physiciens et les médecins de l'UCL, d'un collimateur variable à lames, en vue de limiter autant que possible à la seule tumeur, et avec une grande précision, la zone irradiée aux neutrons. En 1999, l'avis d'un comité indépendant d'experts internationaux sur l'avenir de la neutron-thérapie à CYCLONE 110 a été sollicité. Cet avis fut très positif. Une des conclusions notait : « *it would be a disaster to stop the neutron-therapy programme at Louvain-la-Neuve* ». Une autre conclusion de cet audit fut que, en vue d'améliorer les résultats attendus, il serait très souhaitable de construire, outre le faisceau de neutrons vertical utilisé jusqu'alors, un faisceau de neutrons horizontal et même oblique, en vue de limiter encore plus la dose de neutrons reçue par les

tissus sains du patient en cours de traitement. Une estimation du coût d'une telle amélioration fut réalisée par les ingénieurs du CRC en 1999, avec un total de 90 millions de francs belges de l'époque.

b. La proton-thérapie du cancer

La *proton-thérapie du cancer* fut également pratiquée au moyen des faisceaux de CYCLONE 110, elle fut limitée au traitement des rétinoblastomes (cancers du fond de l'œil) en raison de la portée limitée (5 centimètres) de ces faisceaux dans le corps humain. L'expertise acquise en ce domaine au CRC a néanmoins été reprise, et fortement étendue, par l'Entreprise IBA, laquelle fabrique, installe et entretient, avec un succès croissant (60 % du marché mondial), des cyclotrons de plus haute énergie (230 MeV) que CYCLONE 110, dont les faisceaux permettent d'atteindre n'importe quel organe à l'intérieur du corps humain.

c. La Tomographie par émission de positrons

La Tomographie par émission de positrons (TEP) a débuté au CRC en 1985 avec la mise en service d'une première caméra à positrons, alimentée par les émetteurs de positrons produits, dans un premier temps, au moyen de CYCLONE 110, et, à partir de 1987, au moyen de CYCLONE 30. Cette activité a rassemblé des médecins de différentes spécialités, des physiciens, chimistes, pharmaciens et informaticiens. Cette équipe a perfectionné ses méthodes au cours du temps, notamment par l'achat d'une deuxième caméra plus performante, et ses activités ont couvert une large gamme de domaines médicaux, cardiologie, neurosciences, cancérologie. Une partie de ses activités a été étendue aux Cliniques universitaires de Louvain-en-Woluwé et de Mont-Godinne, lesquelles se sont également équipées de caméras à positrons. Ces activités ont couvert, non seulement la recherche, mais également le radiodiagnostic, indication pour une transplantation cardiaque, fonctionnement cérébral, détection de métastases cancéreuses, etc.

3. Applications en sciences appliquées

Les utilisations du cyclotron en sciences appliquées ont principalement couvert deux domaines : la production de membranes microporeuses et l'étude des dégâts radiatifs dans différents matériaux.

La production de *membranes microporeuses* par bombardement de minces films plastiques au moyen d'ions lourds accélérés à CYCLONE 110, suivi de traitements chimiques adéquats, fut un développement conjoint du CRC, de la Faculté des sciences appliquées de l'UCL et de l'industrie privée, celle-ci étant initialement installée à Louvain-la-Neuve. Les avantages des membranes produites par cette méthode résident, d'une part dans la possibilité de fixer dans une large gamme les diamètres des pores (de 10 nanomètres à 10 micromètres), d'autre part

dans la grande uniformité de ces diamètres (à 5 % près). Cette activité a été développée, et se poursuit encore actuellement, au cyclotron CYCLONE 110, particulièrement bien adapté à cet usage grâce à la large gamme d'énergies et de types d'ions lourds qu'il permet d'accélérer, et à son coût horaire relativement réduit en comparaison à celui d'autres installations fournissant les mêmes faisceaux.

L'étude des *dégâts radiatifs* dans différents matériaux a débuté par l'investigation de ces dégâts tels qu'occasionnés par les rayons cosmiques dans les composants électroniques et informatiques embarqués à bord des satellites ou d'avions volant à très haute altitude. Le cyclotron CYCLONE 110 était idéalement placé pour étudier de tels dégâts, compte tenu de la large gamme de particules qu'il permet d'accélérer; depuis les protons jusqu'aux ions xénons, ainsi que de la disponibilité de faisceaux de neutrons rapides. Pour cette raison, l'Agence spatiale européenne (European Space Agency, ESA) a conclu, avec le CRC, un contrat de longue durée, qui a permis de construire, auprès de CYCLONE 110, une ligne de faisceau et son interface utilisateur spécialement conçue pour ces mesures. Mise en service en 1996, cette ligne a été utilisée initialement par des chercheurs de l'ESA et des membres de la Faculté des sciences appliquées de l'UCL, en vue, notamment, de « qualifier » les composants embarqués à bord des satellites européens. Par la suite, une application supplémentaire de cette ligne a été – et est encore – l'étude du comportement des composants électroniques et informatiques utilisés prés des grands accélérateurs de particules de la physique des hautes énergies, par exemple le *Large Hadron Collider* (LHC) du Centre européen de recherches nucléaires (CERN) à Genève, dont la mise en service est prévue durant cette année 2007.

C. Synthèse de la période 1990-1998

Il est donc clair, par ce qui précède, que, durant la période faste 1990-1998, les activités du Centre de recherches du cyclotron de l'UCL à Louvain-la-Neuve ont connu des développements remarquables : diversification des faisceaux accélérés, faisceaux d'ions radioactifs, faisceaux d'ions lourds stables, faisceaux de neutrons rapides ; diversification des applications de ces faisceaux, dans la recherche fondamentale en physique et astrophysique nucléaires, dans la recherche appliquée en chimie et médecine nucléaires, dans les applications industrielles et spatiales, membranes de microfiltration et dégâts radiatifs ; diversification aussi dans les utilisateurs de ces faisceaux, au niveau belge dans le cadre de PAI, au niveau européen grâce à des contrats avec la Commission européenne, et au niveau mondial. Le CRC était d'ailleurs, à l'époque, le seul laboratoire belge soutenu par la Commission européenne dans le cadre de son programme de « Grands équipements scientifiques d'intérêt euro-

péen » (« Large Installation Plan »), lequel a couvert plusieurs Programmes Cadres (« *Framework Programmes* ») pour le soutien à la recherche scientifique européenne. Enfin, le Centre de recherches du cyclotron avait, de par ses activités, suscité la création d'Entreprises industrielles en Région wallonne, au premier rang desquelles l'Entreprise *Ion Beam Applications* (IBA), installée à Louvain-la-Neuve et dont l'UCL était – et est encore – un des principaux actionnaires.

II. Une période de ralentissement : 1999-2005

La période faste de 1990 à 1998 fut suivie, pour le CRC, par une période de ralentissement de ses activités, due à diverses actions des Autorités Académiques de l'UCL de l'époque. Ces actions visaient à réduire les activités du département de Physique de l'UCL dans le domaine de la physique nucléaire en vue de transférer les ressources correspondantes, en termes de personnel et de budget, vers d'autres types de recherches. Ces actions, dont la description détaillée sort du cadre du présent ouvrage, ont comporté : un Plan Stratégique pour le développement du département de Physique de l'UCL pour la période 1997-2007 ; un audit de ce document, et, en général, des activités de ce département, par trois auditeurs soigneusement choisis ; le non-renouvellement, dans l'orientation de physique nucléaire, des postes devenus vacants dans cette orientation, suite à l'admission de leurs titulaires à l'éméritat ou à la pension ; l'annulation de la contribution de l'UCL – modeste (10 %) – au budget annuel du CRC.

Les résultats de ces actions furent un ralentissement important des activités auprès des cyclotrons du CRC dans tous les domaines décrits plus haut. En physique et astrophysique nucléaire, ces activités se concentrèrent sur un petit nombre de réactions nucléaires d'intérêt astrophysique, grâce, notamment, au développement de nouveaux faisceaux d'ions radioactifs, par exemple ^{7}Be, et à l'augmentation de leurs intensités, ainsi qu'à la mise en service de nouveaux appareillages très performants, par exemple un séparateur de recul à haut pouvoir de séparation. Ces recherches, dont l'intérêt est indéniable, se sont cependant trouvées ralenties, en raison du départ à la retraite de professeurs et chercheurs œuvrant dans ce domaine, et du ralentissement de l'afflux des chercheurs étrangers, en particulier européens, auprès des installations du CRC, dû à la réduction de la collaboration scientifique locale. Le programme de neutron-thérapie du cancer décrit plus haut fut arrêté en 1999, malgré l'avis des urologues de l'UCL spécialisés dans le traitement du cancer de la prostate. Le programme de Tomographie par émission de positrons fut partiellement transféré aux Cliniques universitaires de Louvain-en-Woluwe et de Mont-Godinne, en raison, notamment, de la réduction du support scientifique et technique de cette activité à Louvain-la-Neuve due au départ de plusieurs de ses membres à l'éméritat ou à l'étranger.

III. Éléments d'avenir : 2005-2007

Malgré les vents et tempêtes contraires durant la période 1999-2005, et avec le soutien des nouvelles Autorités académiques de l'UCL en fonction depuis la rentrée 2005, les chercheurs, ingénieurs et techniciens travaillant auprès des cyclotrons du CRC maintiennent des activités scientifiques au CRC selon les lignes décrites ci-dessous.

Tout d'abord, le CRC reste présent, comme par le passé, dans les programmes de physique et astrophysique nucléaires soutenus financièrement par la Commission européenne. C'est le cas pour le programme EURONS (*EUROpean Nuclear Structure*), lequel rassemble tous les laboratoires européens de physique nucléaire. Ce programme prolonge, et amplifie, pour la période 2002-2007, les programmes antérieurs FINA (*Frontiers In Nuclear physics and Astrophysics*, 1997-2000) et FINUPHY (*Frontiers In NUclear PHYsics*, 2000-2005), lesquels avaient été coordonnés par le CRC. Au sein du programme EURONS, le CRC coordonne la partie concernant l'astrophysique nucléaire, via le sous-programme CARINA (*Challenges and Advanced Research In Nuclear Astrophysics*).

En *physique et astrophysique nucléaires*, divers groupes, surtout extérieurs au CRC mais avec des collaborations scientifiques et techniques locales, poursuivent l'exploitation des faisceaux d'ions radioactifs, des faisceaux monocinétiques de neutrons rapides et des faisceaux d'ions lourds stables, dont certaines caractéristiques, variété et intensités, restent uniques au monde.

Dans le domaine des *sciences appliquées*, la production de *membranes microporeuses* a été poursuivie, et même amplifiée en raison, notamment, de l'accroissement du temps de faisceau disponible à CYCLONE 110. Il en est de même pour l'étude des *dégâts radiatifs* dans différents matériaux, dans le cadre, notamment, de l'ESA. Ce dernier domaine s'est même élargi au développement de dispositifs semi-conducteurs résistants aux rayonnements, en vue de leur utilisation auprès des collisionneurs de haute luminosité, tel le *Large Hadron Collider* du CERN à Genève, dont la mise en service est prévue pour l'année 2007. Toujours dans la ligne du programme futur du CERN dans le domaine des Faisceaux Bêtas (*Beta Beams*), le CRC a mis l'expérience et la compétence scientifique et technique de ses membres au service du développement de faisceaux extrêmement intenses du noyau radioactif ^{18}Ne, composante essentielle de ce programme des *Beta Beams*.

Il y a donc un avenir, fut-ce à un rythme plus lent, pour le Centre de recherches du cyclotron de l'UCL à Louvain-la-Neuve, au passé prestigieux, et malgré le ralentissement de ses activités depuis la période 1999-2005.

La physique des réacteurs à l'ULB (1960-2000)

Ernest MUND

Professeur à l'ULB et à l'UCL

I. Introduction

La physique des réacteurs est née au lendemain de la Seconde Guerre mondiale dans la poursuite des travaux qui ont conduit à la mise au point des premières 'piles' atomiques. Elle est donc plus jeune que la physique nucléaire dont elle se distingue par le champ des préoccupations. Elle a cependant des liens étroits avec cette dernière qui lui fournit les données de base (sections efficaces, modèles de noyaux, etc.) dont elle a besoin. En ce début de 21e siècle, la physique des réacteurs a parcouru un chemin considérable le long duquel on retrouve les noms de plusieurs scientifiques belges ayant acquis une réputation internationale.

On sait que la Belgique, dépourvue de ressources majeures en énergie primaire, s'est intéressée très tôt aux applications pacifiques de l'énergie nucléaire dans le but de couvrir ses besoins en électricité. Sa contribution à l'effort de guerre des USA par la fourniture d'uranium dans le cadre du projet Manhattan lui a valu un accès privilégié aux laboratoires de recherche américains. Des scientifiques belges ont séjourné aux USA et se sont formés sur place dans le domaine naissant de la physique des réacteurs (théorique et expérimentale). La création du Centre de recherche nucléaire de Mol (CEAEN, devenu par la suite CEN puis SCK•CEN) en 1952, en fut la conséquence principale avec la conception, la construction et la mise en service des réacteurs BR1 (1956), BR2 (1961), BR3 (1962) et VENUS (1964) décrits dans le volume « Un demi-siècle de nucléaire en Belgique ». Si le Centre de Mol a été le lieu essentiel de développements expérimentaux sur de grandes infrastructures, les universités et bureaux d'études (ACEC, Belgonucleaire, Tractionel, puis Tractebel) ont contribué de manière importante aux développements de nature théorique, en collaboration étroite avec Mol. En ce qui concerne la recherche uni-

versitaire, des travaux ont été réalisés à la RUG par Carl Grosjean et Fernand Vanmassenhove, et à l'ULB autour de la personnalité de Jacques Devooght. Ce sont ces derniers que nous décrivons sommairement dans les pages qui suivent.

II. Les développements au sein du Service de métrologie nucléaire sous Jacques Devooght

J. Devooght rentre, fin 1959, d'un séjour au MIT où il a obtenu le diplôme de '*Master in Nuclear Engineering*'. Après avoir soutenu une thèse d'agrégation de l'enseignement supérieur intitulée *Contribution à la théorie des réacteurs nucléaires non uniformes*, à l'ULB en mai 1961, il prend la direction scientifique du Service de métrologie nucléaire (MN) fondé quelques années auparavant et dirigé par Paul Kipfer. Il crée un cours approfondi de 'théorie des réacteurs nucléaires' sur le modèle de celui qui est enseigné au MIT. Par sa rigueur scientifique et sa passion pour la recherche en physique et mathématiques appliquées, il attire d'emblée de brillants jeunes diplômés (ingénieurs civils, licenciés en sciences) auxquels il propose des sujets de doctorat couvrant un domaine très étendu, tant du point de vue théorique qu'expérimental. Sous la direction de Kipfer, le Service de métrologie nucléaire est en effet associé au Service de physique électronique (PE), orienté vers les techniques de mesures des rayonnements ionisants et l'instrumentation nucléaire. De cette association naîtront quelques travaux de grande qualité. Le tableau ci-dessous fournit une liste des thèses de doctorat (D) et d'agrégation de l'enseignement supérieur (AES) effectuées au Service de métrologie nucléaire et soutenues soit à la Faculté des sciences appliquées, soit à la Faculté des sciences de l'ULB[1], du milieu des années 1960 jusqu'en l'an 2000. Il permet d'apprécier la diversité des sujets traités.

Tableau 1 : Liste de thèses de doctorat et d'agrégation de l'enseignement supérieur préparées au Service de métrologie nucléaire de 1965 à 2000

Année	Nom	Titre
1965	A. Mockel	Contribution à l'étude du transport des neutrons dans les systèmes plans (D)
1966	S. Lejeune	Contribution à la mesure absolue de la fraction Mössbauer (D)
1968	R. Beauwens	Étude du transport des neutrons en milieu hétérogène par la méthode des sources superficielles (D)
1969	D. Crommelynck	Étude et réalisation d'un simulateur de réactivité et son application à la simulation d'un réacteur nucléaire pilote (D)

[1] À l'exception de la thèse de M.M. Malambu, soutenue à la Faculté des sciences de l'UCL.

1969	W. Singer	Étude de la comparaison des étalons gamma par des méthodes de compensation, au moyen du Radon-222 pris comme étalon intermédiaire (D)
1970	Y. Goscinny	Spectrométrie Mössbauer des composés organostanniques (D)
1971	P. Goldschmidt	Contribution à l'étude de l'utilisation optimale du combustible dans les réacteurs nucléaires (D)
1971	Cl. Machgeels	Contribution à l'étude de la cinétique d'ensembles sous-critiques à neutrons pulsés (D)
1971	E. Mund	Contribution à l'étude de modèles synthétiques de ralentissement des neutrons (D)
1972	J.P. Hennart	Généralisations des méthodes multigroupes appliquées au calcul des réacteurs nucléaires rapides (D)
1972	J.J. Van Binnebeek	Étude du comportement des assemblages périodiques hétérogènes dans des expériences de neutrons pulsés (D)
1975	Ph. Kinet	Étude expérimentale de la cinétique d'un réseau sous-critique de petites dimensions au moyen d'une source pulsée de neutrons
1976	J.Cl. Dehaes	Contribution à l'étude de la spectroscopie Mössbauer en coïncidence et application à l'étain-119 (D)
1981	E. Mund	Contribution au développement de méthodes numériques pour l'analyse de la cinétique spatio-temporelle des réacteurs nucléaires (AES)
1982	N. Hollasky	Neutronique d'une colonne de graphite en présence d'une ou de plusieurs cavités transversales vides (D)
1987	A. Dubus	Application de méthodes de neutronique au transport d'électrons à basse énergie dans les solides et notamment à l'émission d'électrons secondaires (D)
1989	H. Bersini	La modélisation cognitive dans l'étude des systèmes homme-machines (D)
1990	C. Smidts	Simulation des séquences industrielles accidentelles prenant en compte le facteur humain. Application au domaine des centrales nucléaires (D)
1991	Y. Notay	Résolution itérative de systèmes linéaires par factorisations approchées (D)
1992	M.M Magolu	Sparse Approximate Block Factorizations for Solving Symmetric Positive (Semi) Definite Linear Systems (D)
1994	X. Huang	Méthodes de décomposition de l'espace des phases en cellules finies (D)
1994	M.M. Malambu	Contribution aux méthodes nodales pour les équations de diffusion multigroupe de neutrons (D)
1994	A.Van de Velde	A Multidimensional Boundary Sources Method (D)
1995	B. Tombuyses	Modélisation markovienne en fiabilité. Réduction des grands systèmes (D)
1996	P.E. Labeau	Méthodes semi-analytiques et outils de simulation en dynamique probabiliste (D)
1997	O. Smidts	Analyse probabiliste du risque du stockage des déchets radioactifs par la méthode des arbres d'événements continus (D)
1998	Y. Notay	Préconditionnement de matrices M symétriques (AES)

Les premiers travaux expérimentaux (travaux de fin d'études et thèses de doctorat) sont consacrés à l'analyse par activation neutronique et à l'étude de l'effet Mössbauer dans le fer-57 et l'étain-119 (Lejeune, Dehaes). Certains travaux sont réalisés en collaboration avec le Service de chimie organique (Goscinny). L'étude de l'effet Mössbauer n'est pas directement en rapport avec la théorie des réacteurs, mais elle permet aux deux laboratoires (MN et PE) de maîtriser progressivement des techniques de mesures utilisées en physique nucléaire des basses énergies *et* en physique expérimentale des réacteurs. Il convient de rappeler que ces deux domaines étaient étroitement liés à l'origine. Si la physique nucléaire des basses et moyennes énergies a aujourd'hui totalement disparu au SCK•CEN, il fut un temps où elle y était pratiquée de manière importante, par une équipe de renommée internationale composée entre autres de M. Nève de Mévergnies, P. del Marmol, P. Fettweis et S. Hautecler.

Le Service de métrologie nucléaire ayant acquis un accélérateur électrostatique SAMES et disposant d'un réseau sous-critique (fait de barreaux d'uranium naturel gainés d'aluminium aimablement prêtés par l'UMHK) des travaux sont entrepris qui portent sur l'étude du comportement spatio-temporel d'impulsions de neutrons dans des milieux de géométries et de compositions variées. Une équipe de techniciens de très grande qualité, composée de J. Carmeliet (électronique), M. Ooms (installation, entretien et conduite de l'accélérateur) et E. Uyttenhoef (mécanique), permet de mener ces travaux à bien. L'accélération d'un faisceau de deutons sur une cible de tritium permet d'obtenir des neutrons de 14 MeV. La mesure des constantes de décroissance temporelle des impulsions de neutrons et sa prédiction théorique sera un thème fréquemment abordé, de même que l'étude du « *diffusion cooling* » dans des modérateurs en géométrie simple et de petite taille accentuant les effets de fuite (voir plus loin). Les développements expérimentaux seront hélas limités du fait des difficultés de gestion d'une installation 'neutronique' en milieu universitaire ainsi que des limitations de crédit. *In fine* la partie expérimentale des activités 'physique des réacteurs' du service ne couvrira plus que les besoins de l'enseignement avec, dans ce domaine, une collaboration de plus en plus étroite entre l'ULB et le Centre nucléaire de Mol.

C'est dans le domaine des recherches théoriques que les développements seront les plus soutenus, les plus importants et aussi les plus variés. Ils évolueront considérablement au cours du temps grâce à deux facteurs déterminants : d'une part, la multiplication des centres d'intérêt engendrés par une étude de plus en plus fine du comportement physique, de l'exploitation et de la sûreté des réacteurs ; d'autre part, la disponibilité de moyens de calcul de plus en plus puissants. Il convient de rappeler qu'en 1964 le centre de calcul de l'ULB était équipé d'un seul ordinateur *main-frame* IBM 7040 (à 32Kb de mémoire et 10 μs de temps d'horloge par

opération arithmétique) pour couvrir *tous* les besoins de la recherche au sein de l'université. En l'espace de 30 ans, tailles mémoire et temps d'horloge seront améliorés d'un facteur avoisinant les 10^9 ce qui aura une profonde influence sur la nature des travaux entrepris.

Au début des années 1960, les méthodes numériques étant encore à leurs débuts (pleins de promesses), les premiers travaux théoriques en transport de neutrons font une large place aux méthodes analytiques dans la tradition des travaux entrepris par des physiciens renommés comme Case, Chandrasekhar, Davison, Placzek, Wigner. Les 'thésards' sont ainsi fortement encouragés à approfondir leurs connaissances en analyse mathématique (équations différentielles, équations aux dérivées partielles, équations intégrales, méthodes variationnelles, etc.) voire à aborder l'étude de l'analyse fonctionnelle, domaine dont très peu d'ingénieurs de l'époque ont entendu parler. Devooght est un fin connaisseur de l'analyse, ayant fait du célèbre traité en deux volumes de Morse et Feshbach intitulé *Methods in Theoretical Physics* un de ses ouvrages de référence. Il manipule l'outil mathématique avec un art consommé et il n'a pas son pareil pour exhumer des travaux oubliés de la littérature mathématique auxquels il va donner un nouveau souffle et qui contribueront à faire des avancées importantes dans les différents sujets traités. Les étudiants qui entrent dans son bureau savent qu'ils en ressortiront les bras chargés d'articles à lire et d'ouvrages à consulter. Le foisonnement d'idées impressionne et porte ses fruits. Les veilleurs de nuit de l'ULB sont habitués à voir des lumières allumées au Service de métrologie nucléaire, à certaines périodes de l'année jusqu'à potron-minet.

Les thèses de Mockel et de Beauwens sont très représentatives de l'approche des problèmes en neutronique du milieu des années 1960. Elles visent à fournir une solution approchée de l'équation de Boltzmann dans une géométrie non élémentaire par l'utilisation d'un maximum d'outils analytiques bien maîtrisés (fonctions de Green de problèmes de référence, fonctions spéciales, etc.) conduisant à la résolution de systèmes algébriques (ou de problèmes aux valeurs propres) de taille raisonnable. Une fois ceux-ci construits, le problème est mis sur ordinateur et fournit la (ou les) solution(s) recherchée(s). Ces méthodes que l'on pourrait qualifier de 'semi-analytiques' ont toutefois leurs propres limitations. Elles cèderont peu à peu la place à une attaque plus 'frontale' de l'équation de Boltzmann, dans toute sa complexité et sur des géométries réalistes. Certaines de ces méthodes feront cependant un retour remarqué trente ans plus tard lorsque l'informatique aura fait de tels progrès qu'une part importante de leurs limitations aura disparu. Nous verrons ceci plus loin.

Il est caractéristique de l'époque que tous les chercheurs produisent leurs propres logiciels pour résoudre les problèmes qu'ils affrontent, jusque et y compris dans leurs aspects les plus triviaux ; intégration

numérique, résolution de systèmes algébriques, calculs de valeurs propres, représentation graphique, etc. Les plus intrépides vont même jusqu'à apprendre et à utiliser le langage d'assemblage de manière à tirer un profit maximum de moyens de calcul limités. Ceci aura deux conséquences à terme : un intérêt de plus en plus grand au sein du service pour le développement des méthodes numériques (en particulier, pour l'algèbre linéaire) et un intérêt jamais diminué pour les développements informatiques. Plusieurs étudiants ayant fait leur mémoire en MN poursuivront d'ailleurs une carrière fructueuse dans ce secteur.

On voit se développer très tôt plusieurs thèmes de recherche outre ceux déjà mentionnés : 1/ des études de cinétique d'ensembles sous-critiques attaqués par une source pulsée de neutrons combinant mesure de décroissances exponentielles et interprétation de celles-ci, un problème délicat bien connu (Machgeels) et détermination théorique et expérimentale des paramètres du réseau (Kinet) ; 2/ la modélisation physique des cellules de réacteurs avec ralentissement des neutrons en milieux fortement hétérogènes et absorbants (Mund) ; 3/ les méthodes de calcul 'cœur complet', en diffusion à grand nombre de groupes pour les réacteurs rapides (Hennart) ; 4/ l'application de la méthode de Pontryagin à l'étude de l'utilisation optimale du combustible (Goldschmidt) ; 5/ l'étude des propriétés spectrales d'assemblages périodiques dans des expériences de neutrons pulsés faisant une utilisation intensive de la théorie des groupes (Van Binnebeek). Enfin, si la plupart des travaux de cette époque donnent lieu à des développements de calcul *digital*, l'outil *analogique* est loin d'être ignoré (Crommelynck). Il ne sera toutefois pas poussé plus loin compte tenu des progrès foudroyants qui seront accomplis dans le domaine du « *number crunching* ».

Le début des années 1960 coïncide avec l'introduction des éléments finis (EF) dans les méthodes de calcul des réacteurs. La MN va rapidement se lancer dans cette voie et ira très loin dans le développement de cet outil, tant en diffusion qu'en transport (travaux de Beauwens et Mund). Un autre axe de recherche très important à cette date (et qui donnera lieu à de nombreuses publications) est celui des méthodes de type 'A-stable' d'intégration dans le temps pour la résolution de problèmes '*stiffs*' (c'est-à-dire caractérisés par des échelles de temps différant de plusieurs décades). Après quelques travaux de fin d'études mettant en œuvre des calculs éléments finis et des méthodes de type A-stable d'une classe nouvelle satisfaisant des propriétés d'interpolation de modes de décroissance connus, la MN s'associe au Centre nucléaire de Mol (A. Siebertz, P. Dugnoille, B. Arien) pour la mise en œuvre de CASSANDRE, un code de calcul diffusion multigroupe dépendant du temps, utilisant des EF lagrangiens en 2D *xy* (cartésien) ou *rz* (cylindrique) pour la partie spatiale. Pour la partie temporelle ce code met en œuvre une

généralisation développée à Bruxelles de la méthode quasi-statique de Ott et Meneley. Le module neutronique est accompagné d'un module thermo-hydraulique assez simplifié. CASSANDRE est destiné à réaliser des études de sûreté des réacteurs. Il est financé par un contrat de recherche européen octroyé en 1975-1976 par la DG III-E2. Sa mise en œuvre et sa validation sur des problèmes de référence prendront quelques années. Le code est disponible à la bibliothèque de la NEA.

Durant les années 1980, l'élaboration de doctorats en physique des réacteurs expérimentale touche à sa fin (Hollasky). Mais, un autre sujet apparaît (tant expérimental que théorique) qui sera développé avec de nombreuses applications technologiques à la clé : l'application de méthodes neutroniques au transport d'électrons à basse énergie dans des solides et, notamment, à l'émission d'électrons secondaires. En fait, depuis le milieu des années 1970 la MN s'est lancée dans des expériences de '*Beam-Foil Spectroscopy*' (interaction faisceau d'électrons/feuille mince), un domaine qui lui permet de mettre en valeur ses acquis dans l'utilisation des techniques de mesures (travaux de Kinet, Singer et Dehaes). Elle perçoit qu'à terme, ce domaine pourra remplacer les expériences de physique des réacteurs de plus en plus difficiles à concevoir pour les raisons évoquées plus haut. Il y a un lien à faire avec la compréhension des phénomènes observés. L'étude théorique de l'interaction faisceau/lame n'est pas neuve mais, pour des raisons diverses, laisse à désirer. Certaines méthodes de neutronique, quoique 'lourdes' ont déjà été appliquées avec succès. La thèse de Dubus va explorer d'autres pistes, avec confrontation des calculs à des résultats expérimentaux publiés dans la littérature. Dans le cas présent ce sont donc les *méthodes* appliquées (noyau synthétique de ralentissement, modèle 'âge-diffusion') qui sont identiques, mais le phénomène étudié est totalement différent.

C'est à cette époque également que se dessine une nouvelle orientation des travaux de recherche qui sera extrêmement fructueuse et à l'avant-garde du savoir dans le domaine. À partir du milieu des années 1970, le débat fait rage partout dans le monde autour de la sûreté des réacteurs nucléaires (« *How safe is safe enough ?* »). Le rapport WASH-1400 (aussi appelé rapport Rasmussen) publié en 1975 a quantifié la probabilité (par an) de fusion d'un cœur de réacteur à eau légère. Pour ce faire, il a utilisé une méthodologie probabiliste connue sous le nom de 'arbres d'événement/arbres de défaillance' qui part des caractéristiques de défaillance de *toutes* les composantes d'une installation pour en déduire la probabilité qu'un 'événement initiateur', quel qu'il soit, produise un accident majeur avec relâchement de produits de fission dans l'environnement. L'accident de Three Mile Island quelque temps plus tard, illustrera que la chose n'est pas impossible mais, heureusement, ne conduira pas aux scénarios catastrophes. Les résultats de WASH-1400 sont contestés, surtout

s'agissant de probabilités extrêmement faibles ($<10^{-6}$/an). La méthodologie mise en œuvre (quoique 'état-de-l'art' de l'époque) souffre de nombreux défauts dont il est hors de propos de parler ici. Devooght saisit immédiatement la portée des enjeux et entrevoit des solutions. Il va désormais orienter ses travaux de recherche en vue de 'répondre' aux objections faites aux études probabilistes de risque de l'époque, ce qui ne veut pas dire qu'il abandonne pour autant ses autres centres d'intérêt. Des travaux de fin d'études vont être proposés en 'fiabilité', cette discipline mathématique récente qui s'intéresse à la détermination de la probabilité de fonctionnement de systèmes complexes. Peu à peu ces travaux de fins d'études vont déboucher sur des thèses de doctorat. C'est dans ce contexte qu'il faut placer celles de Bersini et de Carol Smidts..Certes, une fois encore, il ne s'agit pas de physique des réacteurs à proprement parler. Mais, et la chose est assez remarquable, on en est très proche. En effet la thèse de Smidts utilise une approche markovienne dans laquelle un système est caractérisé par une probabilité (dépendant du temps) d'être dans un état donné. Cette probabilité obéit à une équation dite de Chapman-Kolmogorov qui a la structure d'une équation de transport. La notion d'*arbre d'événement discret* (WASH-1400) peut donc être remplacée par celle d'*arbre d'événement continu*, beaucoup plus riche sur le plan intellectuel, plus proche de la réalité et très novatrice.

Les recherches effectuées dans les autres domaines (algèbre linéaire, calcul des réacteurs) se poursuivent par ailleurs et aboutissent dans les années 1990 à de nouvelles thèses de doctorat et d'agrégation de l'enseignement supérieur : Notay et Magolu pour le premier domaine, Huang, Malambu et Van de Velde pour le second. Après le développement du code CASSANDRE (en théorie de diffusion) la MN s'associe au JRC-Ispra, à la demande de ce dernier, pour équiper d'un module d'intégration dans le temps le code HEXNOD de transport multigroupe en géométrie 'hexagonale-z'. Ce code doit être intégré au code européen pour la description d'accidents de réacteurs rapides. La méthode quasi-statique est considérée une fois de plus comme la voie à suivre et un contrat de recherche est signé pour la réalisation du code HEXNODYN, extension 'dynamique' du code HEXNOD. Ce dernier, élaboré par Wagner chez KWU-Siemens, à Erlangen utilise une méthode nodale de transport dont la précision est limitée. Pour garantir la qualité de l'intégration dans le temps il convient d'évaluer des réactivités avec grande précision et, donc d'améliorer la solution de transport de départ. C'est l'objet de la thèse de Van de Velde. La méthode des sources superficielles abandonnée 25 ans auparavant pour les raisons invoquées plus haut est remise sur le métier et fournit d'excellents résultats, comme d'ailleurs les EF nodaux de Malambu en diffusion et les 'matrices-réponses' de Huang en transport.

L'approfondissement des connaissances en fiabilité se poursuit et donne lieu à des thèses de doctorat importantes consacrées à des développements de méthodologie (Tombuyses, Labeau) comme à des applications (Olivier Smidts). L'importance capitale de la fiabilité pour les études de sûreté et les résultats extrêmement prometteurs de l'approche markovienne donnent lieu à une nouvelle initiative de collaboration entre la MN et le Centre de Mol pour l'élaboration d'un code de calcul utilisant cette méthodologie. Ce sera le code CAMERA qui est destiné à 'couler' dans un moule industriel les résultats obtenus dans la thèse de Tombuyses et à combiner ceux-ci avec une utilisation intensive des possibilités graphiques offertes par les stations de travail. Hélas, pour des raisons totalement indépendantes de considérations scientifiques, ce code ne verra jamais le jour.

Si l'on fait abstraction des fluctuations durant les trente cinq années décrites ci-dessus, le Service de métrologie nucléaire se compose de quatre postes permanents et de quatre postes à durée limitée. La plupart des chercheurs quittent la MN une fois leur thèse achevée, certains cependant y restent. Ce sont eux qui forment le cadre permanent d'aujourd'hui. Les relations internationales sont nombreuses (Europe de l'Ouest et de l'Est, USA, Mexique, Algérie, Maroc, etc.) avec de nombreux échanges dans les deux sens. Les publications se font de manière extrêmement régulière dans des revues internationales de premier plan couvrant tous les domaines étudiés (physique des réacteurs, mathématiques appliquées, physique nucléaire et instrumentation, beam-foil spectroscopy, transport d'électrons, fiabilité). La participation aux conférences internationales est elle aussi presque systématique. En 35 ans, le nombre de publications s'élèvera à environ 500. Au début, il y a une règle 'non écrite' selon laquelle ne méritent de publications dans des journaux à '*referee*' que les travaux ayant fait l'objet de véritables avancées ou dont le caractère novateur le justifie. Le but est d'éviter l'inflation des papiers avec tous les inconvénients qui peuvent en résulter. En ce qui le concerne personnellement, Devooght adhèrera toujours *scrupuleusement* à cette règle. Au cours du temps, les nécessités de présentation de *curriculum vitae* étoffés par de jeunes chercheurs en quête de promotion, changeront peu à peu les pratiques.

III. Le futur

Jacques Devooght avait pris la direction effective du Service de métrologie nucléaire en 1975 au départ à la retraite de Paul Kipfer. Il prend lui-même sa retraite en 1998, cédant la place à Robert Beauwens (lequel sera remplacé par Alain Dubus en 2005). Il prévoyait la rédaction d'un ouvrage sur les arbres d'événement continus mais il décédera peu de temps après, avant même d'avoir entamé son projet (août 1999). La vie scientifique de la Métrologie nucléaire avait déjà atteint depuis longtemps

le stade de la 'criticité' et s'était considérablement diversifiée. Elle se poursuit avec le même enthousiasme. Certes, les temps ont changé et les méthodes de travail ne sont plus les mêmes. Mais, la créativité est bien présente comme le prouvent les publications régulières dans les journaux internationaux, l'assistance aux réunions scientifiques et l'intégration au sein des réseaux de recherche étrangers. Surtout, la jeune génération est persuadée de l'importance de sa discipline. Modeste, elle sait qu'elle ne résoudra pas à elle seule, tous les problèmes. Mais elle est persuadée de l'intérêt de l'énergie nucléaire pour l'avenir et elle est bien décidée à apporter sa pierre à l'édifice, avec les standards de qualité les plus élevés.

PARTIE II

RECHERCHE & DÉVELOPPEMENT ET INDUSTRIE

SCK•CEN – Évolution 1990-2005

Pierre D'HONDT

Directeur général adjoint
du Centre de recherche nucléaire belge (SCK•CEN)[1]

I. Introduction

Le SCK•CEN a été créé en 1952 afin de permettre au monde industriel et universitaire belge d'avoir accès au développement mondial de l'industrie nucléaire. Depuis 1991, la mission statutaire donne la priorité à l'examen de problèmes ayant trait à la société :

- sécurité des installations nucléaires ;
- radioprotection ;
- traitement sûr des déchets radioactifs et leur stockage ;
- lutte contre la prolifération non contrôlée de matériaux combustibles ;
- lutte contre le terrorisme.

En 1990 la décision fut prise de transférer les unités de recherche non nucléaires et 37 % de l'effectif et des moyens du SCK•CEN à la Communauté flamande. Le SCK•CEN est scindé par arrêté royal du 16 octobre 1991. Les activités non nucléaires ressortissent désormais au VITO (*Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek*/Institution flamande pour la recherche technologique) fraîchement créée.

Le VITO est un organisme régional flamand, le SCK•CEN reste sous contrôle fédéral.

La scission a signifié une réduction sensible du personnel, de l'expertise technique et scientifique y afférente et des installations et moyens financiers pour la recherche nucléaire. Toutefois, le SCK•CEN s'attela à

---

[1] Avec la coopération de Hamid Aït Abderrahim, Peter Baeten, Michèle Coeck, Jérôme Dadoumont, Marc Decréton, Frank Hardeman, Luc Holmstock, Mark Loos, Gaston Meskens, Frans Moons, Filip Vanhavere, Hans Vanmarcke, Eric van Walle, Anne Verledens, Marc Verwerft, Geert Volckaert.

une renaissance qualitative, en mettant l'accent sur les expériences nucléaires autour de la sûreté des réacteurs, de la radioprotection, des déchets radioactifs et du démantèlement.

Les principales installations dans ce cadre sont :

A. BR2

BR2 est un des réacteurs de recherche les plus puissants au monde. Il est utilisé pour tester des matériaux et des combustibles destinés à divers types de réacteur et pour le programme européen de fusion. Il est également un composant non négligeable dans la production de radioisotopes pour les applications médicales et industrielles et pour le dopage du silicium destiné à l'industrie électronique.

B. BR1

BR1 est un réacteur d'une puissance de 4MW, refroidi par air et utilisant le graphite comme modérateur. Il est fréquemment utilisé comme source de neutrons pour des analyses d'activation, le calibrage de dosimètres, pour la radiographie neutronique et des expériences en réacteur servant de référence.

C. VENUS

L'installation à puissance nulle VENUS permet une analyse détaillée des configurations de cœur, y compris du MOX et de combustibles à haut degré d'épuisement (*burn-up*). Il est utilisé de manière intensive pour la validation de configurations de cœur de réacteurs et de codes de criticité.

D. BR3

BR3 était un prototype de réacteurs à eau pressurisée (PWR). Il a été choisi comme projet pilote européen pour les activités suivantes : l'optimisation de techniques et de procédés de démantèlement et de décontamination, une estimation réaliste des coûts ainsi que pour le développement de nouvelles techniques de réduction de volume pour les déchets secondaires et la minimalisation de doses de radiations pour le personnel.

E. HADES

Le laboratoire HADES situé à 225 m de profondeur a pour but l'étude des formations argileuses comme site potentiel de dépôt pour les déchets hautement radioactifs et de longue demi-vie. Le laboratoire est exploité par EURIDICE, le groupement d'intérêt économique entre NIRAS/ ONDRAF (l'organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies) et le SCK•CEN. Ce laboratoire souterrain a été récem-

ment agrandi pour la réalisation de tests à grande échelle ayant trait à la faisabilité et la sûreté d'un dépôt de déchets nucléaires générateurs de chaleur.

F. LHMA

Le laboratoire de haute et de moyenne activité évalue les conséquences de la radiation sur des matériaux utilisés dans les installations nucléaires actuelles et futures. Un large éventail des instruments de recherche mécaniques, physico-chimiques et de microstructure est disponible à l'intérieur comme à l'extérieur des cellules chaudes à télécommande. Le laboratoire est impliqué dans la recherche appliquée et la recherche élémentaire appuyée par des modèles mathématiques pour la vérification et la prévision du comportement de matériaux nucléaires pendant leur durée de vie.

G. Analyse nucléaire et laboratoires chimiques

Le SCK•CEN mesure et évalue la contamination interne du personnel d'installations nucléaires, la contamination du sol et des chaînes alimentaires. Les laboratoires soutiennent également les réacteurs de recherche et autres laboratoires pour la recherche destructive et non destructive de matériaux hautement radioactifs. Ces laboratoires soutiennent également le plan d'urgence nucléaire auquel le SCK•CEN fournit une importante contribution dans le cadre de la politique belge et européenne.

H. MYRRHA (pour l'instant : projet d'étude)

MYRRHA est un *Accelerator Driven Subcritical System* (ADS). Il se compose d'un accélérateur de protons avec un faisceau de protons de 350 MeV x 5 mA, dirigé sur une cible de Pb-Bi dans un cœur sous-critique refroidi au Pb-Bi. MYRRHA servira de base pour l'ADS expérimental européen. Il fournira des protons et neutrons pour diverses applications de R&D, comme par exemple les études de transmutation.

II. Technologie des réacteurs

A. BR1

Le BR1 – *Belgian Reactor One* – est le premier réacteur belge. Il fut rendu critique pour la première fois le 11 mai 1956. Le BR1 est un réacteur refroidi par air, modéré au graphite, et d'une puissance thermique de 4 MW. Il constitue un instrument flexible pour la recherche fondamentale et pour les formations. Son combustible est de l'uranium naturel sous forme métallique (25 t environ).

Après la phase du démarrage, le BR1 fut surtout utilisé pour la recherche de physique du réacteur et la physique neutronique. Jusqu'en 1964,

l'année du démarrage du BR2, il fut également utilisé pour la production de radioisotopes. Le réacteur a fonctionné en régime continu de 24 heures sur 24 et de 7 jours sur 7.

Les réseaux de mesure nucléaires du BR1 furent renouvelés en 1980 et la conduite électromécanique du système de détection de fuites de combustible fut remplacée en 1999. En ce moment, le réacteur fonctionne uniquement à la demande des chercheurs et cela pour une durée maximum de 8 heures par jour, à une puissance de 700 kW (des pointes de courte durée de 1 MW sont également possibles).

Un fait remarquable est que le combustible du BR1 est encore toujours le combustible d'origine ; son taux d'épuisement (*burn-up*) après 50 ans de fonctionnement est inférieur à 1 %. Grâce à sa flexibilité, son faible coût d'exploitation et de fonctionnement, l'accès aisé aux canaux d'irradiation, le BR1 est encore toujours un instrument très utile pour l'industrie, pour les centres de recherche et les universités.

Les canaux d'irradiation servent régulièrement pour diverses applications industrielles et domaines de recherche telles que :

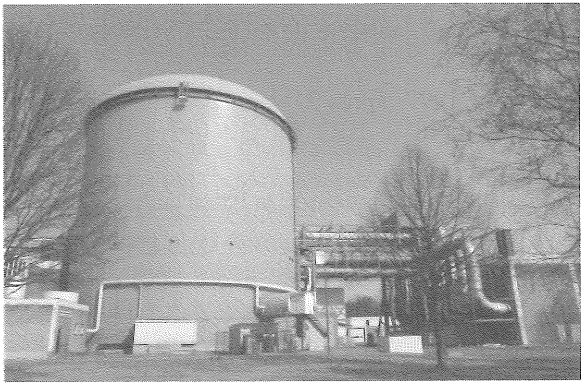
- l'analyse par activation neutronique : il s'agit d'une méthode analytique très précise pour la détermination de la composition de toutes sortes de matériaux, y compris les oligoéléments ;
- l'activation d'oligoéléments pour la détection de fuites dans les conduites de divers dispositifs chimiques, pour l'analyse de la durée du séjour et pour la mesure du débit ;
- l'irradiation de composants électroniques utilisés dans l'espace et dans l'industrie nucléaire ;
- le calibrage de détecteurs neutroniques et gamma.

L'année 2006 fut l'année au cours de laquelle le SCK•CEN fêta le 50e anniversaire du réacteur. À cette occasion, la *American Nuclear Society* décerna au BR1 le « *Nuclear Historic Landmark* » pour son rôle de doyen des réacteurs de recherche pour applications pacifiques.

B. BR2

Le réacteur BR2, fut conçu en 1957 et mis en service en 1963. Le BR2 est un réacteur d'essai de matériaux d'une puissance maximum de 125 MW. Il fut rénové et modernisé en 1980 et en 1996. Grâce à son haut flux neutronique et ses nombreuses possibilités d'irradiation, le BR2 est considéré comme un des réacteurs de recherche de matériaux les plus performants au monde. Au courant des 15 dernières années, divers projets technologiques ont été étendus et de nouveaux programmes ont été lancés.

Figure 1 : Vue externe du réacteur BR2



1. Rénovation du BR2

Après le remplacement de la matrice, en 1979-1980, le BR2 connut une rénovation au courant des années 1990. La matrice de béryllium dut être remplacée afin de pouvoir prolonger l'opérationnalité du BR2 de quelques décennies. Au cours des années 1991-1992, l'équipe avait déjà dressé l'inventaire de tous les systèmes critiques et équipements, tels que les options d'amélioration de la sécurité, du vieillissement, de la fiabilité et de la performance, afin de pouvoir les examiner de manière plus détaillée.

Des contrôles détaillés, des études expérimentales et théoriques et des prévisions du comportement des composants critiques de l'installation ont été faits en 1993. Une attention particulière fut entre autres accordée à la cuve du réacteur, à la nouvelle matrice de béryllium, à la piscine du réacteur, aux principaux échangeurs de chaleur, la boucle d'épuration de l'eau de refroidissement, les principales conduites, le contrôle du processus et l'instrumentation, l'équipement électrique, les bâtiments et les systèmes d'isolation, les systèmes de protection contre l'incendie, le canal de stockage et le stockage de la première matrice de béryllium.

À partir de 1994 on poursuivit des études sur :

- l'influence de la fragilisation suite à l'irradiation à long terme ;
- la fiabilité de la cuve de réacteur en aluminium ;
- la fiabilité de quelques fonctions de sécurité dans le circuit de refroidissement primaire ;
- la réaction thermohydraulique du refroidissement du réacteur après d'importantes ruptures hypothétiques du circuit primaire ;
- les possibilités de prévoir une meilleure sécurité passive du refroidissement du réacteur ;

- la fiabilité de certains instruments ;
- les capteurs d'arrêt d'urgence et l'alimentation en courant ;
- les conséquences pour la sûreté de facteurs externes tels que les tremblements de terre.

Le mardi 14 avril 1997, après 21 mois d'intenses travaux de rénovation et de modernisation, le BR2 fut redémarré dans les délais et les budgets prévus.

Voici quelques dates ayant marqué la vaste tâche de la rénovation :

23 juin 1995. Le cycle 04/95 est arrêté et le cœur du réacteur est déchargé après une série de mesures nucléaires.

1er août 1995. Démarrage de la rénovation et déchargement des installations d'essai (CALLISTO, SIDONIE, etc.).

9 novembre 1995. Le premier canal de béryllium est déchargé. Un mois plus tard, le 14 décembre, les quelque 120 canaux de béryllium et cales sont déchargés.

Février-novembre 1996. Inspections, entretien et isolation des tubes des faisceaux neutroniques.

10 avril 1996. Démarrage du dispositif d'essai de la troisième matrice de béryllium.

Juin 1996. Examen visuel et ultrasonique de la cuve du réacteur.

16 octobre 1996. Démarrage du chargement de la troisième matrice de béryllium dans la cuve du réacteur. Ce chargement dure jusqu'au 20 novembre 1996.

10 février 1997. Démarrage des essais préopérationnels non nucléaires.

21 mars 1997. Le réacteur est à nouveau critique.

9 avril 1997. Les installations sont prêtes pour un nouveau démarrage.

2. *CALLISTO (Capability for Light Water Irradiation in Steady-state and Transient Operation)*

En 1991 on travailla de manière ininterrompue à la construction et au démarrage de CALLISTO. Il s'agit d'une boucle expérimentale de type PWR, ce qui fait de CALLISTO un dispositif d'irradiation quasi unique en Europe. Dans CALLISTO on assure l'irradiation de faisceaux combustibles avancés pour réacteur à eau pressurisée (environnement PWR) dans des conditions normales et réelles (pression, température, thermohydraulique, flux neutronique et chimie de l'eau). Le dispositif permet au SCK•CEN d'étudier de manière approfondie le comportement de combustible LWR commercial, de UO_2 et de MOX à taux d'épuisement très élevé, jusqu'à 60 GWj par tonne de métal.

La boucle CALLISTO devint entièrement opérationnelle du point de vue nucléaire en 1992, ce qui constitua un événement important pour le SCK•CEN et son partenaire Belgonuclaire. La réalisation de l'accord avec des clients japonais et anglais pour l'irradiation de combustible, débuta en 1992.

En 1993 les activités scientifiques se concentrèrent sur la qualité des déterminations de la puissance linéaire dans chaque barre combustible et sur une meilleure compréhension du comportement complexe de la chimie de l'eau, ce qui permit de développer des modèles appropriés.

Outre les progrès réalisés au niveau des irradiations commerciales et scientifiques, l'année 1993 fut marquée par un incident regrettable : suite à une augmentation erronée de la puissance du réacteur, une aiguille combustible instrumentée fut gravement endommagée. Malgré le coût élevé du remplacement de la barre combustible, cette subite augmentation de la puissance illustra clairement que le réacteur BR2 (qui ne fut nullement endommagé) ainsi que l'installation expérimentale (qui maintint sous contrôle tous les rayonnements libérés) étaient d'une conception excellente.

3. Production de radioisotopes

Le réacteur BR2 produit des isotopes servant entre autres aux applications de diagnostic et de thérapie en médecine nucléaire, pour le contrôle de soudures industrielles et comme marqueur pour l'agriculture. De par son flux neutronique élevé, le BR2 est l'outil idéal pour la production d'isotopes tels que le ^{32}P, ^{41}Ar, ^{60}Co, ^{82}Br, ^{89}Sr, ^{90}Y, ^{99}Mo, ^{125}I, ^{131}I, ^{133}Xe, ^{147}Nd, ^{153}Sm, ^{169}Yb, ^{177}Lu, ^{186}Re, ^{188}W, ^{192}Ir, ^{203}Hg, etc.

Le BR2, tout comme d'autres réacteurs d'essai de matériaux, produisit depuis son début des radioisotopes devant essentiellement servir à des fins de recherche. La production semi-industrielle commença au début des années 1980 et comportait entre autre la production de ^{99}Mo à l'aide d'un seul dispositif d'irradiation. Après la rénovation de 1997, cette production fut décuplée. La disparition d'une journée de production au BR2 a immédiatement des effets tangibles pour le secteur de la médecine.

La production de radioisotopes relève de la certification ISO.

4. SIDONIE (Silicon Doping by Neutron Irradiation Experiment)

Un accord de collaboration avec AEA Technology (Royaume-Uni), pour la construction et l'exploitation dans BR2 d'un dispositif d'irradiation pour le dopage de cristaux de silicium par irradiation neutronique, fut signé en 1990.

L'installation devint entièrement opérationnelle en 1992. Des irradiations d'essai sur des barres de silicium originelles de clients japonais et

allemands démontrèrent que SIDONIE était en mesure de fournir des produits répondant aux exigences élevées des clients.

En raison du marasme économique dans lequel se trouvait la micro-électronique, la demande resta initialement en deçà des prévisions.

En 1993 la production de silicium irradié connut cependant une reprise prometteuse. La quantité totale augmenta initialement de 60 % et atteignit rapidement la capacité nominale de quelque 10 t par an. Le flux élevé du réacteur BR2 assure un temps de passage favorable ; ceci signifie que par rapport aux autres réacteurs la durée d'irradiation est inférieure. La production de silicium dopé par des neutrons dans SIDONIE bénéficie de la certification ISO.

L'installation SIDONIE peut également être utilisée pour des expériences à caractère plus scientifique.

5. *POSEIDON (POol Side Equipment for Irradiation and DOping of silicon by Neutrons)*

POSEIDON répond à la double demande de la part de l'industrie des semi-conducteurs pour obtenir, d'une part, une plus grande production de silicium dopé et, d'autre part, pour doper des cristaux de silicium de plus grande taille. Le silicium dopé au moyen de neutrons constitue un semi-conducteur d'une excellente qualité en raison de son homogénéité intrinsèque. L'utilisation de cristaux de grande taille permet à l'industrie des puces électroniques d'augmenter la production. SIDONIE est limitée à des cristaux d'un diamètre de 12,5 cm. L'industrie électronique utilise déjà des cristaux de 15 et de 20 cm de diamètre, tandis que dans leurs laboratoires de recherche on traite des cristaux d'un diamètre de 30 cm.

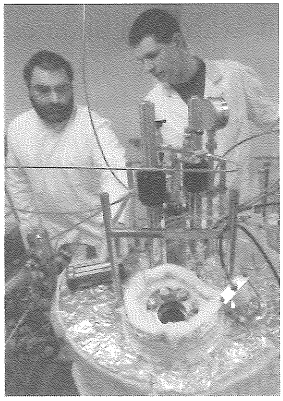
L'installation POSEIDON permet à la fois d'augmenter la production et de traiter des cristaux de plus grande taille. La pièce essentielle de POSEIDON consiste en un gros bloc de graphite placé contre la cuve du réacteur. Ce bloc de graphite comporte six orifices dans lesquels les cristaux de silicium sont irradiés. POSEIDON entre en service en 2007.

6. *Perspectives*

Les principaux objectifs du groupe d'expertise du réacteur de recherche BR2 continuent à être l'exploitation sûre et économique du réacteur pour des essais de combustible et de matériaux pour divers types de réacteurs existants et futurs, ainsi que pour la production de radioisotopes et de semi-conducteurs. De plus on poursuit le perfectionnement de modèles pour le système opérationnel du réacteur et ses installations expérimentales.

*C. MYRRHA (*Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications*)*

Figure 2 : Développement d'un système ADS



Après une crise mondiale dans la fourniture de molybdène 99, l'isotope le plus utilisé en médecine nucléaire, IBA (*Ion Beam Applications*, Louvain-la-Neuve), proposa, fin 1994, de produire le ^{99}Mo au moyen d'un ADS (*Accelerator Driven System*). IBA a demandé au SCK•CEN de se charger de la conception du cœur sous-critique de cet ADS et de déterminer sa performance. En 1995, le Centre décida de s'associer au projet et se chargea de la conception du cœur sous-critique et de la cible de spallation. Ce nouveau système de production de radioisotopes recevrait le nom d'ADONIS (*Accelerator Driven Operated New Isotope System*). IBA se chargea de la conception de l'accélérateur de particules. La conclusion de l'étude de faisabilité, réalisée en 1997, était que ADONIS devrait être capable d'assurer la production de la moitié de la demande mondiale de ^{99}Mo de l'époque.

En 1998, lorsque le projet ADONIS fut achevé, le SCK•CEN lança l'étude de faisabilité du projet MYRRHA. Le développement de l'avant-projet débuta en 1999, pour une période de 3 ans, et fut étayé par un solide programme de R&D internationalement apprécié. MYRRHA deviendrait un réacteur sous-critique d'une puissance de 50 MWth, contrôlé par une source neutronique intense elle-même actionnée par un accélérateur de particules à haute puissance (350 MeV x 5 mA).

Calendrier

1999 – 11/2001 Draft – 0

On parle ici d'un accélérateur de 350 MeV x 5 mA et d'un cœur produisant ~ 40 MW_{th}

Ce dossier comporte deux chapitres principaux : le design mécanique et les calculs neutroniques, soutenus par quelques notes de calcul sommaires et d'un *pre-design* du combustible.

Le *reviewing* a été réalisé en Russie par IPPE (Obninsk) et GIDROPRESS (Moscou).

Modifications (Draft 0 → Draft-1) sur la base des commentaires des experts russes.

05/2002 Draft – 1

Ce dossier comporte la même structure que Draft-0. Il fut soumis à un ITGC (*International Technological Guidance Committee*) qui s'est réuni deux fois en Belgique.

La conclusion majeure de l'ITGC est qu'il n'y a pas de problème majeur (« *there is no show stopper* »), mais que certaines parties du dossier doivent être étoffées ; en particulier, l'ITGC insiste pour qu'un chapitre « *safety studies* » soit ajouté au dossier.

03/2005 Draft – 2

Il s'agit d'un dossier bien plus complet, puisque des chapitres relatifs à la cible de spallation, au combustible, au génie civil et aux études de sûreté en font maintenant partie. De même, un chapitre envisage un « *System operation, inspection & maintenance* », et une estimation globale des coûts termine le dossier. Les caractéristiques de l'accélérateur sont toujours de 350 MeV x 5 mA ; le cœur produit de l'ordre de 50 MWth ; le système primaire est capable d'évacuer 60 MWth. Le dossier « Draft-2 » a été relu en interne au SCK•CEN : la conclusion majeure est que les aspects chimiques doivent être étudiés (ils font depuis lors partie de notre programme R&D).

04/2005

Début du projet EUROTRANS au sein du 6e Programme cadre de la Commission européenne. Ce projet durera 4 ans (jusque 03/2009). Dans EUROTRANS on envisage le design conceptuel d'une machine industrielle pour le long terme (EFIT, *European Facility for Industrial Transmutation*) et un pré-design avancé d'une machine expérimentale pour le court terme (XT-ADS, *eXperimental demonstration of Transmutation in an ADS*).

09/2005

Nous envoyons la version finale du MYRRHA Draft 2 aux partenaires du projet EUROTRANS, pour servir de base à XT-ADS. La direction du SCK•CEN offre à la communauté internationale d'installer XT-ADS sur son site à Mol.

Actuellement le concept de MYRRHA est amélioré et développé au sein du projet EUROTRANS ; le but étant d'obtenir un « *advanced design* » de XT-ADS, incluant une évaluation des coûts d'investissement, pour 03/2009.

Un calendrier provisionnel pour les années suivantes est le suivant :

2009-2011

Detailed engineering design, le but étant d'obtenir les plans de fabrication de l'ensemble des composants ;

Développement et essais de composants innovateurs (il ne s'agit plus ici de recherche fondamentale, mais de recherche appliquée bien spécifique) ;

Les procédures d'autorisation commencent déjà à ce stade.

2012-2014

Construction des composants (tant de l'accélérateur que du réacteur) chez les fabricants ;

Préparation du site et travaux de génie civil.

2015

Assemblage sur le site des différents composants.

2016-2017

Démarrage de l'ensemble des composants (« *commissioning* »).

2018

Le système est opérationnel.

Le projet a pour but de remplacer le BR2, tout en assurant une extension de ses applications ; celles-ci sont possibles grâce aux flux neutroniques et énergétiques élevés. Ceux-ci sont nécessaires pour les études expérimentales sur la sûreté des réacteurs, la résistance aux radiations des matériaux et le combustible des réacteurs de la IVe génération, la fusion et les applications médicales. Grâce au spectre rapide de MYRRHA et à sa sous-criticité, MYRRHA permet en outre de faire de la recherche sur la destruction de déchets de haute activité et à longue demi-vie (transmutation).

D. VENUS (Vulcain Experimental Nuclear Study)

Les codes de réacteurs sont utilisés lors de l'exploitation d'installations nucléaires pour optimiser l'utilisation de la charge de combustible. Ces codes ont prouvé leur utilité pour la détermination de la configuration optimale du combustible pour ce qui concerne les paramètres tels que la répartition de la puissance, l'économie et la charge neutronique dans la cuve du réacteur. Si l'on veut déroger à la configuration standard et

explorer de nouveaux domaines, il convient de revalider les codes. Le dispositif critique VENUS se prête particulièrement bien à cette fin : grâce à la flexibilité de l'installation il est possible de faire des simulations réalistes de nouvelles configurations du cœur.

1. Venus International Programmes : VIP, VIPO, VIPEX

Figure 3 : Vue sur le réacteur VENUS



Le recyclage dans des réacteurs à eau légère du plutonium en provenance des centrales nucléaires, occupe une place importante dans l'optimisation du cycle du combustible. Les autorités exigent en effet que les différences en matière de sécurité et les conditions thermohydrauliques et neutroniques soient correctement définies en cas de réutilisation du plutonium. À cela s'ajoute la demande des producteurs d'énergie de disposer de codes de calcul validés pour l'utilisation efficace du chargement de combustible. Les programmes VIP (*Venus International Programme*), VIPO (*Void coefficient measurement In Plutonium Oxide lattices*) et VIPEX (VIP Extension) cadrent dans cette demande. Ces projets ont donné lieu à une banque de données sur les combustibles MOX et UO_2, qui a permis de traiter un grand nombre de problèmes au niveau des aspects neutroniques du recyclage de plutonium dans des réacteurs LWR.

Un programme expérimental pour réacteurs BWR a été lancé dans VENUS en 1990. Un an plus tard, un programme pour réacteurs PWR a été réalisé. La première phase, c'est-à-dire le programme VIP, portant sur les aspects de masse critique, de répartition de la puissance et de la ré-

ponse des détecteurs, tant pour les réacteurs BWR que PWR, a été achevée en 1992.

Le programme VIPEX, une extension de la première phase, était axé sur les aspects spécifiquement liés à l'exploitation, tels que l'effet de la réactivité de l'incorporation de l'^{241}Am, l'utilisation de poisons consommables tels que le gadolinium et les variations de la densité du modérateur pour les réacteurs à eau bouillante. Pour le projet VENUS, l'équipe de VENUS a étudié les aspects de sûreté lors de la formation de bulles d'air dans du combustible MOX hautement enrichi.

2. REBUS

Le programme REBUS, réalisé de 2000 à 2005, avait pour but de valider les codes de calcul du transport neutronique dans le cadre de l'application du « *burn-up credit* ». Lorsque l'on calcule la combustion nucléaire (*burn-up*) du combustible pendant le fonctionnement du réacteur, pour déterminer la criticité des stockages et des conteneurs de transport, on peut réaliser un stockage très compact du combustible irradié, ce qui représente un gain économique (crédit) lié au taux de combustion du combustible : le *burn-up credit*.

Afin d'augmenter l'effet mesurable du *burn-up credit* dans VENUS, la hauteur du cœur de VENUS a été portée de 0,5 m à 1 m. Pour cela il a fallu remplacer la plupart des parties internes de la cuve. De plus, pour permettre le chargement du combustible irradié (50 GWj/t, durée de refroidissement de 7 ans), une structure supplémentaire a été construite au-dessus du réacteur afin de pouvoir positionner le conteneur chargé du faisceau irradié. Ceci permet d'introduire le faisceau, par télémanipulation, dans le réacteur. Le chargement du combustible irradié dans un réacteur de puissance zéro tel que VENUS, dans le cadre du projet REBUS, peut être considéré à juste titre comme étant une première mondiale.

3. GUINEVERE

Le projet GUINEVERE a été initialisé en 2006 et fait partie du sixième programme cadre « IP-EUROTRANS » ayant pour but d'examiner les principaux aspects en vue du développement du ADS (*Accelerator Driven Systems*) dans le cadre du P&T (Partitioning & Transmutation), dont le but final est de réaliser une réduction des volumes et de la radiotoxicité des déchets nucléaires.

Étant donné que de tels systèmes (ADS) doivent toujours être sous-critiques, la mesure en ligne de la sous-criticité est un aspect capital de la sécurité. Le projet GUINEVERE a pour but de valider les méthodes de mesure pour le monitoring en ligne de la sous-criticité. Pour ce faire, il

faut disposer de la jonction d'un accélérateur à un réacteur rapide. C'est pourquoi le réacteur VENUS modéré par eau sera transformé en un réacteur rapide composé de plomb, qui simulera le réfrigérant liquide plomb-bismuth d'un ADS. L'accélérateur qui sera couplé au réacteur VENUS modifié, est un accélérateur deutéron GENEPI dont les deutérons dirigés sur une cible de tritium produiront des neutrons de 14 MeV. Dans le cadre de la coopération européenne, cet accélérateur sera conçu par le CNRS, le centre de recherche français. Le CEA prêtera le combustible nécessaire à cette expérience. Ce projet, qui dure de 2007 à 2012, nécessite avant tout l'adaptation de l'installation actuelle. En 2007-2008 on procédera aux modifications nécessaires à l'installation afin de permettre la transformation en un réacteur rapide et pour pouvoir implémenter la jonction d'un accélérateur.

E. Fusion

Le SCK•CEN s'est lancé dans le programme européen de fusion en 1974. Le SCK•CEN disposait d'une expérience longue de plusieurs années dans le domaine des dégâts d'irradiation causés par des neutrons dans des matériaux de structure de réacteurs de fission et dans le domaine de leur activation.

Suite à l'ampleur croissante de la technologie de fusion, le programme belge de fusion dut être adapté. Au milieu des années 1980, cette part devint tellement importante que la contribution belge au programme de fusion fut scindée en, d'une part, le volet physique du plasma, qui fut confié à l'École royale militaire et, d'autre part, le volet technologie de la fusion dont le SCK•CEN prit la direction. Le SCK•CEN reçut pour mission d'associer d'autres instituts et industries à ce volet technologique. Ceci donna lieu à une collaboration avec la KULeuven dans le domaine de la corrosion et avec la Faculté polytechnique de Mons dans le domaine des capteurs. Des partenaires industriels tels que Gradel Luxemburg et IBA de Louvain-la-Neuve participeront également dans un stade ultérieur.

La principale contribution du SCK•CEN consistait en la construction et en l'exploitation d'un système permettant d'effectuer dans le réacteur BR2 des essais de fatigue sur des matériaux de construction potentiels de la paroi devant contenir le plasma. Cette recherche a été arrêtée lors du *refurbishment* du BR2.

Le nombre d'irradiations dans BR2 fut graduellement augmenté de 1998 à 2006. Le SCK•CEN fournit à présent la moitié de la contribution belge au programme de fusion. L'autre moitié est fournie par l'École royale militaire et la ULB, nos deux partenaires dans la *Belgian Association for Fusion*. Le SCK•CEN est actif dans les domaines de la technologie des réacteurs, tandis que les partenaires se chargent de la physique du plasma.

Le SCK•CEN représente en ce moment 0,7 % de la recherche européenne de fusion. Pour 2006 ceci représente 25 collaborateurs à temps plein, mais en réalité il s'agit de plus de 100 personnes qui, d'une manière ou d'une autre, sont actives dans le domaine de la recherche de fusion. Les principales contributions proviennent de deux départements : Recherche des matériaux de réacteurs (effets des radiations sur les propriétés mécaniques et de corrosion des matériaux de structure) et Instrumentation (instrumentation dans un environnement à radiations pour le diagnostic plasma et la télécommande). Dans ces deux domaines, nous assurons la coordination de la recherche européenne pour ces domaines spécifiques.

Depuis quelques années, EFDA, l'organisme qui coordonne la recherche de fusion en Europe, accorde également une attention aux aspects économiques et sociaux de la fusion en tant que source d'énergie. Un des domaines de la recherche est « La fusion et l'opinion publique ». On souhaite en effet connaître l'opinion de la population à propos de la fusion et de la recherche sur la fusion. Un des principaux points d'attention en ce moment est l'attitude de la population quant à l'implantation éventuelle d'ITER à Cadarache. En collaboration avec IRSN (France) et CEPE (Suisse), le SCK•CEN a lancé un projet de sondage de l'attitude de la population, des autorités locales, des diverses associations et services d'intervention à propos de l'implantation éventuelle dans la région. Ceci se fait à l'aide de « groupes à focalisation », qui sont des discussions semi-guidées de groupes.

Un certain nombre de points importants ont été traités lors de ces discussions de groupes :

- la perception des risques (sécurité, mais aussi le risque financier) ;
- l'incidence sur la région, (p.ex. infrastructure routière, prix des terrains) ;
- le caractère expérimental de l'installation (et la distinction entre la fusion et la fission) ;
- la dimension internationale du projet (tant la gestion que l'établissement des collaborateurs) ;
- le rôle des divers acteurs (scientifiques, politiques, etc.) ;
- les besoins en information et en communication.

Ce dernier point a reçu beaucoup d'attention dans les différents groupes.

III. Démantèlement

Le 30 juin 1987, le réacteur BR3, considéré comme le premier réacteur européen à pression d'eau, a été mis à l'arrêt. Dans le cadre de la réalisation d'un programme européen de 5 ans intitulé « Recherche et développement technologique pour le démantèlement d'installations

nucléaires », le BR3, outre trois autres installations européennes, a également été retenu comme projet pilote pour la démonstration du démantèlement de centrales PWR. L'objectif de ces projets est d'acquérir la connaissance scientifique et technique nécessaire pour démanteler dans des circonstances réelles.

Une série de techniques de découpage (vrille, scie à ruban, électroérosion, usinage par étincelage et torches à plasma) ont été appliquées avec succès en laboratoire, mais devaient encore être adaptées et testées avant leur utilisation dans un milieu radioactif, sous eau. En 1991 une première démonstration a été faite du découpage de l'écran thermique hautement actif de la cuve du réacteur, un cylindre en inox de 2,2 m pesant 5 t. L'écran est découpé en 40 morceaux, de 50 x 50 cm chacun, pour le transport et le stockage. Par la suite, des techniques ont été élaborées et appliquées pour la découpe de tous les éléments internes à géométrie complexe et dégageant un taux élevé de radioactivité. Cette phase est particulièrement intéressante car la géométrie et la composition des éléments correspondent à celles de réacteurs de haute puissance. Le projet ne se limite toutefois pas aux éléments internes du réacteur : des études de démantèlement en dehors de la boucle primaire du réacteur et de la cuve elle-même, ont démarré en 1992. Une seconde phase consistait en la décontamination de la boucle primaire. Cette opération a réduit l'irradiation active d'un facteur 10. Pour protéger les travailleurs, des techniques ont également été élaborées (p.ex. la robotique) pour réduire la dose d'irradiation durant les travaux de démantèlement.

Ensuite les structures internes activées de la cuve du réacteur, qui soutiennent le cœur du réacteur et l'instrumentation et la cuve du réacteur elle-même, sont découpées en morceaux, éliminées et stockées au moyen de techniques de découpage existantes mais adaptées. L'eau, constituant une excellente protection contre l'irradiation et permettant en même temps d'avoir une vue directe des travaux, ceux-ci ont été effectués à l'aide d'une commande à distance et sous eau.

Lors du démantèlement du BR3, on a effectué non seulement de la recherche sur les différentes techniques de découpage et leur usage pratique dans le démantèlement. Parallèlement au découpage des structures activées, diverses méthodes ont également été examinées pour la décontamination de matériaux contaminés. Ceci a conduit à la construction d'une unité de sablage, ZOE et une unité de désinfection chimique MEDOC. Dès que ces installations furent opérationnelles, les circuits contaminés furent démantelés. Selon le planning, le démantèlement de la centrale serait terminé pour 2009.

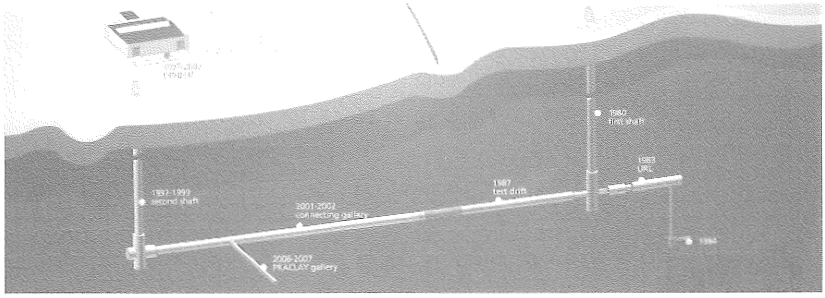
Durant l'exploitation du BR3, le réacteur a été alimenté 11 fois en combustible. Les deux premiers chargements se composaient de 32 éléments, le troisième de 73 éléments. Le combustible des deux premiers

chargements a été traité dans l'usine Eurochemic de l'époque. Le combustible restant, entreposé dans le bassin de désactivation du BR3 a été évacué dans des conteneurs Castor du BR3 en 2002. Le Castor du BR3 est un conteneur servant à entreposer du combustible durant au minimum 50 ans dans une enveloppe de gaz inerte (He). Ensuite, en analogie avec le combustible commercial des centrales nucléaires belges, le combustible sera reconditionné pour rendre le stockage géologique possible.

Toutes les données relatives à la dose d'irradiation, aux déchets produits et aux coûts de démantèlement, sont conservées soigneusement dans une banque de données qui pourra servir ultérieurement de base pour prévoir le coût économique et radiologique de nouveaux projets de démantèlement.

IV. Déchets et évacuation

Figure 4 : Schéma d'un stockage géologique

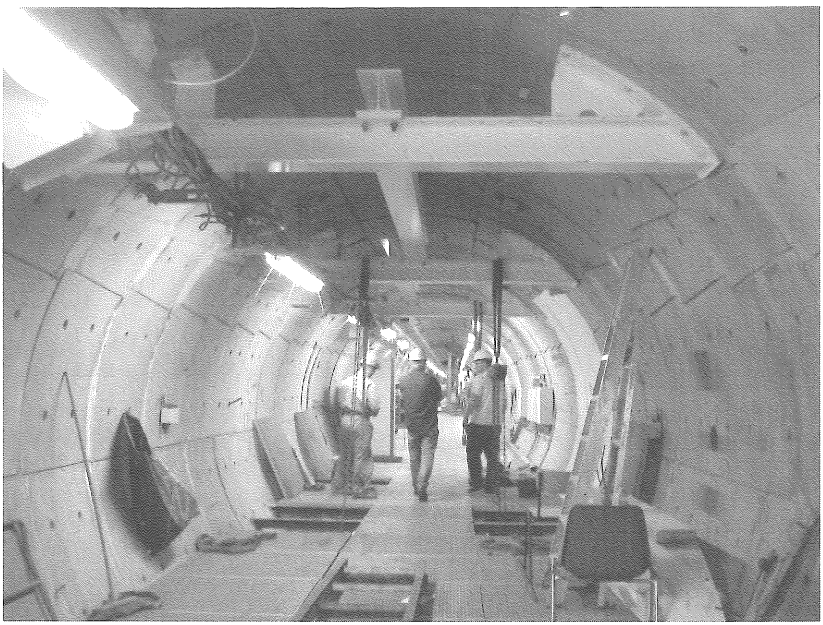


Le SCK•CEN a démarré en 1974 ses recherches sur le stockage géologique de déchets hautement radioactifs dans l'argile. L'argile de Boom, présente sous le site du SCK•CEN, étant considérée à l'époque comme étant une couche géologique possible située sous le domaine technique du SCK•CEN, la construction du laboratoire souterrain HADES fut démarrée en 1980. HADES se situe dans l'argile de Boom à une profondeur de 224 mètres et son extension s'est déroulée en plusieurs phases. Les phases les plus importantes dans le développement de HADES comportent notamment la construction du premier puits d'accès (1980-1982), la construction de l'« *Underground Research Laboratory* » (URL) (1982-1983) et le puits expérimental (1983-1984), l'extension du laboratoire par le « *Test Drift* » (1987), la construction du deuxième puits (1997-1999) et la réalisation de la galerie de jonction (2001-2002). La construction du laboratoire souterrain a démontré qu'il était techniquement possible de creuser des puits et des galeries dans une couche d'argile plastique. Par

ailleurs, les techniques d'excavation se sont améliorées constamment au cours des phases successives et des méthodes ont été développées selon lesquelles la perturbation de la formation d'argile est minimalisée.

Depuis 1997, l'exploitation du laboratoire souterrain de recherche HADES est assurée par le GIE-EURIDICE, un accord de collaboration économique entre le SCK•CEN et l'Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies (ONDRAF/NIRAS). Le laboratoire de recherches HADES est reconnu sur le plan international comme centre d'expertise pour le stockage dans l'argile dans le cadre de l'AIEA « *Network of Centres of Excellence for the Demonstration and the Training in Radioactive Waste Disposal Technologies in Underground Research Facilities* ».

Figure 5 : Vue d'une galerie souterraine du laboratoire HADES



Outre le laboratoire souterrain HADES, toute une infrastructure de recherche a été mise sur pied en surface pour effectuer des expériences quant au comportement des déchets radioactifs et aux barrières artificielles qui entourent ces déchets, quant à la caractérisation géochimique de l'argile de Boom et au comportement chimique ainsi que le transport de radionucléides dans le système d'évacuation.

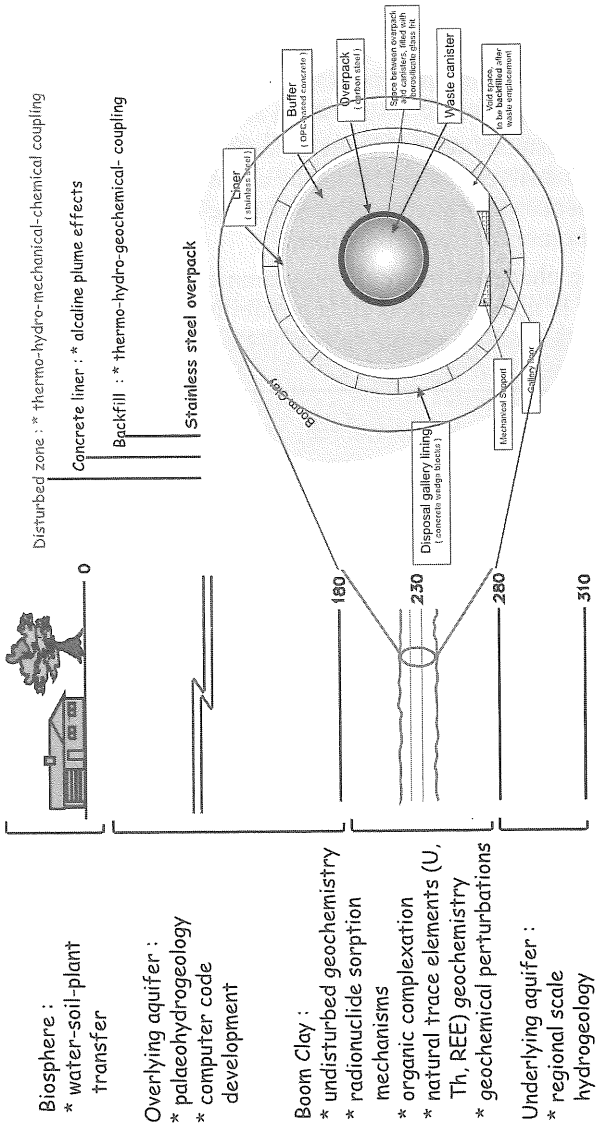
Par ailleurs, de nombreux forages d'observation ont été effectués sur tout le territoire belge où l'argile de Boom est présente. L'objectif était d'établir une vue d'ensemble de la couche d'argile de Boom et de caractériser l'écoulement d'eaux souterraines. Des modèles informatiques ont été développés pour l'interprétation des expériences. À ce propos, le SCK•CEN dispose de codes à la fois géochimiques, hydrogéologiques comme (thermo)mécaniques pour le calcul du transport de radionucléides et leur propagation dans la biosphère.

Tous les résultats de recherche et les modélisations sont utilisés pour effectuer des analyses de performance ayant pour objectif une estimation des conséquences à long terme d'un stockage géologique de déchets radioactifs sur l'homme et l'environnement.

Dans une phase ultérieure du programme de recherche belge, l'accent sera mis sur la démonstration de la possibilité de stockage géologique sur une exploitation grandeur nature et sur le développement d'un soi-disant rapport sur le « *Safety and Feasibility Case 1* ». Dans ce cadre, on a planifié le test de démonstration PRACLAY dans lequel le système de stockage est examiné sur échelle réelle et pour des températures représentatives d'un stockage de déchets vitrifiés hautement radioactifs.

L'illustration ci-après donne un aperçu des sujets de recherche dans le cadre du stockage géologique.

Figure 6 : Aperçu des sujets de recherche dans le cadre du stockage géologique



V. Radioprotection

La radioprotection est à la base d'une grande partie de la recherche quant au risque et au comportement de matières radioactives et du développement de technologie de mesures propres et de méthodes d'évaluation. Cette division est par ailleurs un des piliers en matière de prestation de services à l'attention du gouvernement et de la population.

Sur le plan international, notamment en Europe de l'Est et à Tchernobyl, la division Radioprotection était impliquée dans l'évaluation de risques lors d'une propagation suite à un accident de contamination radioactive par l'air, le sol ou l'eau. Les modèles de propagation ont été examinés et établis. Le groupe de la radioécologie a examiné le comportement expérimental de pollution radioactive dans l'environnement. Cette connaissance a été utilisée pour assainir des zones contaminées. Des propositions pour améliorer la situation de régions contaminées ont été formulées et examinées de manière légitime. À cet effet, il a été tenu compte des facteurs à la fois radiologiques, économiques et sociaux. Sur le plan national, le SCK•CEN a investi dans des moyens de recherche pour ce qui est des applications médicales de radiations ionisantes. La moitié de la dose d'irradiation annuelle de la population provient d'applications médicales. Le SCK•CEN a examiné de concert avec les universités et les hôpitaux comment obtenir des résultats médicaux identiques moyennant une dose plus faible pour le patient et pour l'équipe médicale (optimalisation de la dose).

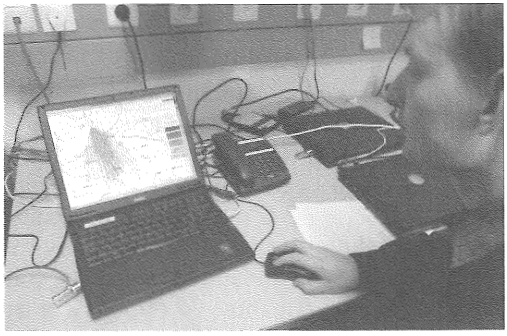
À la demande du gouvernement, le SCK•CEN est également chargé de la surveillance de la contamination radioactive du sol. Les mesures nucléaires sont de plus en plus complexes et multidisciplinaires. Le Centre évalue les très faibles sources de radioactivité jusqu'à un millibecquerel. Bien qu'il s'agisse ici de valeurs exceptionnellement basses, la recherche se focalise sur la diminution de limites de détection.

A. Plan d'urgence

La structure organisationnelle du Plan d'urgence belge a subi d'importantes modifications de par les arrêtés royaux de 1991 et 2003. Ceux-ci ont conduit à des aménagements au sein de l'organisation du plan d'urgence interne. Pour l'heure, le SCK•CEN contribue considérablement dans l'accompagnement du fonctionnement du plan d'urgence du Service fédéral du ministère de l'Intérieur, plus spécifiquement en assistant les exercices de plan d'urgence des services fédéraux (tels que la préparation, l'exécution et l'évaluation) ; l'expertise dans l'évaluation radiologique, l'appui à la capacité de mesures et la collaboration lors de formations. Dans les années écoulées, des modèles ont été mis sur pied pour les opérateurs nucléaires de Doel, Tihange et de la région campinoise (site Mol-

Dessel) afin de mieux pouvoir estimer les conséquences radiologiques d'un accident éventuel.

Figure 7 : Calcul de conséquences radiologiques sur *laptop*



En outre, le SCK•CEN est actif sur le plan international. Dans le cadre de la recherche européenne, le Centre s'est investi dans le développement du système RODOS qui sert à mieux évaluer l'incidence radiologique, à moyen et à long terme. Le Centre est également actif dans l'élaboration technique de l'échange de données en période de crise, l'amélioration de calculs de modèles sur la base de mesures, etc. Le SCK•CEN organise régulièrement des cours européens de formation autour du plan d'urgence. Par ailleurs, le Centre collabore à des manuels européens de contre-mesures agricoles ou tri de personnes à la suite d'un attentat avec un outil radiologique. Le SCK•CEN met également son expertise à disposition de l'AIEA par le biais de groupes de travail et de réunions de comités techniques. L'objectif est d'améliorer la cohérence du fonctionnement du plan d'urgence dans les différents pays. Il est un fait qu'aujourd'hui, chaque pays à sa propre approche et que peu d'harmonisation et de concertation existent entre les pays voisins. Comme second objectif, le SCK•CEN essaie de traduire les leçons des échanges internationaux dans la pratique belge.

Un important renouvellement dans la récente recherche est l'amélioration de l'implication des parties intéressées (le soi-disant *stakeholder involvement*). Les contre-mesures ne sont pas exclusivement testées par des personnes du gouvernement mais aussi en accord par exemple, avec le secteur agricole ou l'industrie alimentaire. Ceci doit conduire à ce que les contre-mesures imposées soient réalistes (réalisables, acceptables et économiquement raisonnables). Une autre question, prioritaire ces dernières années, est la menace terroriste avec l'utilisation de matériel radiologique. Dans ce créneau le SCK•CEN a été particulièrement actif en

imaginant une réponse appropriée, plus particulièrement pour ce qui est des priorités et besoins concernant les mesures.

B. Radiobiologie

Le but de la recherche radiobiologique dans le domaine de la radioprotection est d'avoir une idée plus précise, aux niveaux cellulaire et moléculaire, des effets d'une exposition aux radiations ionisantes. Cette connaissance constitue la base de l'évaluation des effets sur la santé de la population, des travailleurs et des patients. Bien que le modèle animal demeure important au niveau de l'organisme entier, on se focalise de plus en plus sur l'élucidation des mécanismes impliqués dans la sensibilité à l'irradiation. Dans cette optique, la biologie moléculaire et la plate-forme génomique nous offrent de plus en plus de possibilités. Des bibliothèques complètes de gènes sont actuellement disponibles et permettent d'étudier le rôle et la fonction de gènes individuels ainsi que les relations des gènes entre eux.

Ces dernières années, la recherche radiobiologique s'est concentrée sur :

- l'influence d'une irradiation sur le développement de l'embryon et des gamètes femelles ;
- les effets indirects et tardifs des rayonnements ionisants sur l'organisme en développement ;
- l'influence de l'irradiation sur le système nerveux en développement ;
- la radiosensibilité de la glande thyroïde ;
- les risques génétiques et la radiosensibilité individuelle ;
- les effets biologiques résultant des applications médicales des radiations ionisantes et des radioisotopes, telles que la radiothérapie et l'imagerie médicale.

C. Radioécologie

L'utilisation de l'énergie nucléaire pour la production d'électricité, pour des applications industrielles et militaires, dans la médecine et la recherche, ainsi que le traitement de minerais contenant des substances naturellement radioactives, peuvent être à l'origine d'une contamination de l'environnement. L'expertise principalement développée par le groupe de radioécologie concerne les interactions entre le sol et la plante et en particulier l'influence des propriétés de la rhizosphère (le volume de sol affecté par les racines) sur la mobilité des radionucléides et leur prélèvement par les plantes et la dynamique du cycle des radionucléides en écosystème forestier.

Figure 8 : Vue sur le laboratoire de radioécologie



Les domaines de recherche de ces dernières années sont :

- le comportement de matières radioactives dans la biosphère, l'influence de l'environnement racinaire sur l'absorption et la translocation de radionucléides, le recyclage de ces éléments dans la biomasse en surface et son impact sur l'homme via la chaîne alimentaire ;
- les effets de la radiation sur les plantes dans les régions affectées par une contamination radioactive ;
- le développement de modèles biosphériques pour l'analyse de performance des sites de stockage de déchets radioactifs ;
- l'examen des options d'assainissement pour des sites contaminés ;
- l'étude d'impact radiologique des rejets liés aux installations nucléaires et industrielles.

D. Effet de l'astronautique sur des bactéries

Au cours des années, le SCK•CEN s'est consacré à la recherche spatiale. Dans l'espace, la radiation naturelle est très élevée. Les conditions extrêmes propres à l'environnement spatial ont une incidence sur tout être vivant, qu'il soit d'origine humaine (astronautes) ou d'origine microbiologique (bactéries, moisissures, etc.). Les fortes vibrations ressenties au lancement comme à l'atterrissage, la microgravité tout comme la radia-

tion ionisante durant le vol, peuvent endommager les cellules ou les modifier génétiquement. La combinaison unique de tous ces facteurs dans l'espace peut encore avoir des conséquences plus importantes qui ne peuvent être examinées que lors d'un vol spatial proprement dit. Le SCK•CEN a envoyé des bactéries robustes et non pathogènes lors de trois missions. Frank De Winne entre autre, lors de son voyage spatial de novembre 2002 a effectué pour le compte du SCK•CEN quelques expériences comportant notamment la mutation éventuelle de l'ADN et de gènes. Lors d'une seconde expérience, l'étude a porté sur l'effet de circonstances spatiales sur la mobilité bactérienne. Au retour sur terre, on a pu constater que les bactéries avaient bien survécu à certaines circonstances durant le vol, à savoir : à l'apesanteur et aux rayons cosmiques. On a également constaté que ces circonstances peuvent avoir une incidence sur l'expression (inattendue) de certains gènes.

E. Life support system

Si dans les 20 ans à venir on envisage d'envoyer 6 astronautes sur Mars, le voyage aller/retour durera 3 ans et comportera encore beaucoup de problèmes à résoudre. C'est ainsi qu'il faut prévoir suffisamment d'oxygène, d'eau à usage domestique et sanitaire ainsi que de nourriture pour les astronautes, ce qui revient à 5 kg/jour/personne. Au total, il faudra prévoir 32 t qui doivent accompagner la navette à l'aller sans oublier les 40 t de déchets au retour.

Ce simple exemple démontre que le recyclage est un passage incontournable durant les vols interplanétaires mais aussi dans stations spatiales permanentes sur la lune et sur Mars. Depuis 1989, ASE essaie de mettre sur pied un écosystème fermé en utilisant des bactéries et des plantes. Cet écosystème devrait permettre le recyclage du gaz, de déchets solides et liquides et l'utilisation des rayons solaires servant à transformer l'énergie en biomasse comestible. Ce concept est intitulé la boucle MELISSA. Il s'agit d'un projet mené par le prof. Max Mergeay, responsable du laboratoire SCK•CEN et depuis 1988, une des « têtes pensantes » de ce concept. À l'époque, seule l'ASE croyait en ce projet et ce, malgré le grand scepticisme des milieux astronautiques.

Le concept MELISSA est aujourd'hui mondialement reconnu. Il est également perçu comme un instrument exceptionnel pour le développement de la technologie du recyclage de l'air, de l'eau et des déchets sur terre, même sur le plan industriel.

F. Recherche épidémiologique

Pour pouvoir répondre aux questions des travailleurs et riverains du site nucléaire de Mol-Dessel, le SCK•CEN a démarré il y a quelques

années, une recherche pour examiner le taux de mortalité dans les environs. Les résultats de cette recherche peuvent aussi être consultés sur www. sckcen.be.

La recherche a été effectuée dans 5 communes avoisinantes, à savoir : Mol, Dessel, Retie, Geel et Balen, qui comptent au total près de 100 000 habitants. Le taux de mortalité suite au cancer dans ces communes a été comparé (après corrections pour différences d'âge et de sexe) à celui de la population belge, pour la période 1969-1992. Les chiffres communiqués par l'Institut national des statistiques, concernent tant des données nationales que régionales sur la mortalité due à l'ensemble des cancers, la leucémie, le cancer du poumon, le cancer de la thyroïde et le cancer du sein. Les données démographiques proviennent du Registre national. Comparé à l'ensemble de la population belge, on n'a pas constaté de hausse de la mortalité due au cancer dans la région du site nucléaire de Mol-Dessel.

Dans le passé, de nombreuses études concernant les travailleurs et visant à évaluer de manière directe le risque de faibles doses de radiations, ont été publiées. Même si ces études ne portaient quelquefois que sur quelques dizaines de milliers de travailleurs, les marges d'incertitude statistique sur les estimations du risque demeuraient très importantes. La mortalité due au cancer observée auprès des travailleurs était souvent bien inférieure à celle d'un groupe de contrôle comparable de la population générale (c'est-à-dire moyennant correction pour les différences d'âge et de sexe). Le « *healthy worker effect* » tient un rôle important dans cette constatation. Le taux de mortalité de la population active est inférieur à celui de la population générale. Ceci s'explique par le fait que la population générale contient également des personnes qui sont trop malades pour pouvoir travailler. Un taux de mortalité inférieur dû au cancer est aussi apparu dans l'étude belge portant sur ± 7 300 travailleurs du secteur nucléaire, étude coordonnée par le SCK•CEN.

L'IARC (*International Agency for Research on Cancer*, WHO – Centre international de recherche sur le cancer, OMS) a pris l'initiative de réaliser une étude approfondie, concernant ± 407 000 personnes ayant travaillées pendant au moins 1 an dans le secteur nucléaire : réacteurs nucléaires, recherche nucléaire, traitement des déchets nucléaires, fabrication de combustible nucléaire, production de radioisotopes pour applications médicales, etc. Les données de dosimétrie et de mortalité due au cancer ont été analysées de manière uniforme pour les travailleurs en provenance de 15 pays (Australie, Canada, France, Japon, Royaume-Uni, USA, etc.). Pour la plus grande étude internationale effectuée sur les travailleurs à ce jour, le SCK•CEN a assuré la coordination au niveau belge. Celle-ci concernait les travailleurs des entreprises suivantes : Belgoprocess, Belgonucleaire, Electrabel (sites nucléaires de Doel et de

Tihange) et le SCK•CEN. La durée moyenne de suivi pour l'ensemble du groupe d'étude était de 13 ans.

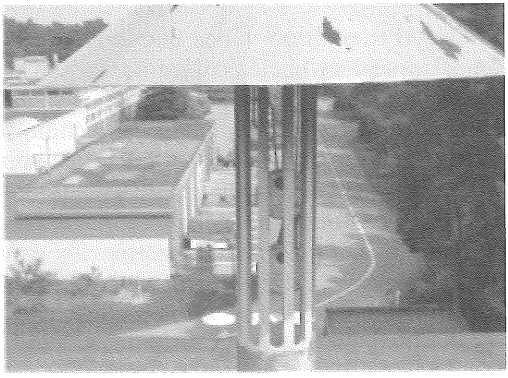
Les faibles doses d'irradiation, telles que celles reçues par exemple, par les travailleurs du secteur nucléaire, sont mises en rapport, selon les résultats d'étude actuels, avec une augmentation – fût-elle faible – du risque de mortalité par cancer du poumon en fonction de la dose. Ceci, malgré le fait que le taux de mortalité due au cancer parmi les (anciens) travailleurs du secteur nucléaire soit nettement inférieur à celui de la population générale. Il y a toutefois des indices que le tabagisme est aussi un des facteurs déterminants pour l'augmentation du cancer du poumon. Les résultats de cette étude internationale ne donnent pas lieu à une révision des normes actuelles de radioprotection. Celles-ci sont surtout basées sur les évaluations du risque qui découlent d'études sur les explosions de bombes atomiques. Il convient de souligner que toutes expositions aux radiations doivent bien entendu toujours être aussi faibles que raisonnablement possible.

Etant donné qu'à la clôture de la période d'observation de cette étude internationale sur les travailleurs, environ 94 % des travailleurs étaient encore en vie, il est capital que cette étude de la mortalité due au cancer soit poursuivie dans l'avenir. Les incertitudes concernant les chiffres des risques de cancer pourront alors encore être réduites. Ces importantes marges d'incertitude concernant les estimations du risque de cancer ne sont pas dues à des méthodes de recherche imprécises, mais au fait que le risque ajouté par les faibles doses de radiations ionisantes est très faible par rapport aux variations de la mortalité « naturelle » due au cancer. En Belgique, le suivi de l'étude sur les travailleurs sera assuré conjointement par le SCK•CEN et l'AFCN.

G. Méthodes de mesure : évolutions dans la spectrométrie et la dosimétrie

En général, les méthodes de mesure nucléaire sont réparties selon le type de rayonnement qu'elles doivent mesurer : le rayonnement gamma, bêta ou alpha. Étant donné que la plupart des radionucléides émettent des rayonnements gamma, la spectrométrie gamma haute résolution est une méthode rapide et fréquemment utilisée pour identifier les radionucléides et déterminer leur radioactivité.

Figure 9 : Vue sur une station de mesure



Chaque année, le laboratoire pour spectrométrie gamma analyse environ 1 600 échantillons dans le cadre de la radioprotection. Il s'occupe de la surveillance radiologique du territoire belge (coordonnée par l'AFCN), de la sécurité de la chaîne alimentaire (coordonné par l'AFSCA), de l'exploitation des réacteurs et des laboratoires nucléaires au site du SCK•CEN. Le laboratoire de spectrométrie gamma est accrédité selon ISO 17025, reconnu par l'AFSCA et est membre du réseau ALMERA, coordonné par l'AIEA.

La législation prévoit des limites quant aux doses pour des personnes travaillant avec des radiations ionisantes. Pour contrôler si ces limites ne sont pas dépassées, les travailleurs doivent porter un dosimètre identifiable. Le service dosimétrie du SCK•CEN fournit et évalue les doses des travailleurs, tant dans l'industrie que dans le secteur nucléaire et médical.

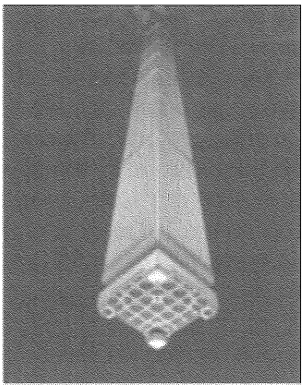
En outre, ce service participe depuis des années à la recherche scientifique, au niveau national et international, sur les divers aspects de la dosimétrie. Ces dernières années, cette recherche était orientée surtout vers :

- le test de nouveaux types de dosimètres personnels passifs et électroniques ;
- le développement de méthodes pour mieux mesurer des doses neutroniques ;
- la mesure des doses de patients et de travailleurs dans le secteur médical, plus particulièrement dans la médecine nucléaire et la radiologie interventionnelle ;
- le développement de la dosimétrie sur la base de la luminescence stimulée optiquement ;
- la mesure de doses d'irradiation dans l'astronautique.

VI. Recherche des matériaux

La recherche des matériaux nucléaires au SCK•CEN est centralisée dans l'institut Recherche des matériaux nucléaires (NMS – *Nuclear Materials Science*). Cette recherche porte, d'une part, sur les matériaux de structure présents dans le cœur d'un réacteur nucléaire et, d'autre part, sur les combustibles d'un réacteur nucléaire. Les matériaux et les combustibles des actuels réacteurs de puissance et ceux des réacteurs de recherche et des réacteurs futurs, font l'objet des recherches. Parmi ces derniers réacteurs, on compte les réacteurs de fission de la IVe génération et le réacteur de fusion.

Figure 10 : Vue d'un élément combustible d'un réacteur à eau pressurisée



Il est notoire que les matériaux de structure (acier et acier inoxydable, alliages de zirconium, etc.) subissent, sous l'influence de l'irradiation neutronique, des modifications microstructurelles ayant une incidence sur leurs propriétés mécaniques. Pour ce qui concerne la recherche des modifications mécaniques, l'attention va vers la fragilisation graduelle de la cuve des réacteurs de puissance. La cuve est en quelque sorte le cœur du réacteur nucléaire. C'est l'endroit où l'eau du circuit primaire est chauffée jusqu'à 300 °C à une pression de 150 bars. La cuve d'un réacteur de puissance dispose d'un programme de surveillance qui prévoit que du matériau d'essai, incorporé lors de la construction, soit retiré du réacteur à intervalles réguliers pour examen. Depuis des dizaines d'années, le SCK•CEN se charge des programmes de surveillance des sept réacteurs belges. Les matériaux d'essai sont testés sur leurs propriétés mécaniques et leurs modifications internes de la structure dans le Laboratoire de haute et de moyenne activité où des techniques modernes d'essai et de recherche peuvent être appliquées. En collaboration avec l'industrie nucléaire

belge, le SCK•CEN a acquis, au fil des ans, une telle expérience et expertise qu'il est à même d'étendre ces activités de suivi et de surveillance vers d'autres pays et qu'il dispose même des compétences nécessaires pour établir des programmes de surveillance pour des réacteurs non courants (p.ex. pour des réacteurs de recherche ou des réacteurs d'un design spécifique). Outre la recherche expérimentale, nous fournissons d'importants efforts dans le domaine théorique pour faire la liaison entre la connaissance des processus atomaires donnant lieu à la fragilisation des matériaux et le comportement macroscopique des composants (« *Multiscale Modelling* »).

La matière fissile est la source d'énergie de tout réacteur de fission. La cuve du réacteur comporte environ 150 faisceaux de 250 aiguilles combustibles chacun ; le nombre exact varie selon le type de réacteur. Chaque aiguille a une longueur de 4 m et un diamètre de 9,5 mm. Une aiguille combustible consiste en une gaine cylindrique fermée faite d'un alliage de zirconium, dans laquelle les pastilles d'oxyde d'uranium sont empilées. Tous les 12 ou 18 mois, 1/3 des faisceaux combustibles sont remplacés. La durée de séjour typique du combustible dans le réacteur est donc de 3 à 5 ans. Au cours de cette période, 5% environ des éléments lourds auront subi une fission, soit une fission directe des isotopes fissiles initialement présents, soit une fission des isotopes transmutés de non-fissiles en fissiles par capture neutronique. La recherche du combustible porte sur le combustible lui-même (gonflement, modification de la composition chimique, évolution de la ductilité thermique, etc.) et sur l'évolution du matériau de gainage qui, en raison de son contact avec l'eau du circuit primaire, se corrode progressivement. La recherche se fait, d'une part, en exposant le combustible à des conditions d'irradiation extrêmes dans un réacteur d'essai (BR2) où l'on peut suivre certains paramètres en ligne et, d'autre part, par des examens détaillés en laboratoires (LHMA). Ces laboratoires disposent tant des équipements nécessaires pour tester l'intégrité d'aiguilles complètes au moyen de recherche visuelle et spectroscopique, que d'une infrastructure de recherche microscopique pour caractériser les matériaux jusqu'au niveau atomique.

À la demande de l'industrie nucléaire, le laboratoire est fréquemment utilisé pour des programmes de recherche internationaux dans lesquels de nouveaux matériaux de gainage et de nouvelles méthodes de production de combustible sont examinés. Le but de ces programmes est d'obtenir une meilleure efficacité. Durant les trente dernières années, un redoublement de la combustion a été réalisé, avec une réduction des ruptures d'aiguilles d'un par 100 000 à un par 1 000 000, ce qui est une amélioration d'un facteur dix. Les résultats de recherche sont intégrés dans des codes qui simulent le comportement de combustibles et utilisés lors du développement de pareils codes. La simulation des processus au niveau

atomique est également une des activités de recherche récemment développées.

Un troisième domaine de recherche se concentre sur la corrosion des parties internes (boulons, broches, parties soudées, etc.) dans la cuve de réacteur. Elles sont faites d'acier inoxydable et sont constamment en contact avec l'eau du circuit primaire. Contrairement à la cuve du réacteur, ces parties peuvent en principe être remplacées. Leur vieillissement fait l'objet d'un suivi dans le programme d'entretien des réacteurs. Le SCK•CEN effectue de la recherche de matériaux afin d'acquérir de meilleures connaissances des processus de corrosion, en particulier la rupture sous contrainte liée à la corrosion. Dans le cadre de cette recherche, le SCK•CEN participe aux programmes internationaux relatifs à cette forme de dégradation. En outre, le SCK•CEN effectue des recherches, en étroite collaboration avec l'industrie nucléaire belge, sur des matériaux utilisés dans les centrales nucléaires en Belgique. Les parties présentant des signes de dégradation lors d'un contrôle dans le réacteur sont également soumises à un examen d'expertise ultérieur. Dans ce domaine également, des activités théoriques importantes sont développées, pour lesquelles l'enclenchement de procédés électrochimiques avec la mécanique de rupture doit conduire à prévoir la formation et l'évolution de ruptures.

VII. Intégration des sciences humaines dans la recherche nucléaire

PISA : Élargir le contexte de la recherche pour une meilleure compréhension – projets de recherche transdisciplinaires du SCK•CEN.

A. Le programme de recherche PISA

PISA est un programme de l'intégration des aspects sociaux dans la recherche nucléaire. Pendant les dernières décennies, l'utilisation sans cesse croissante de la technologie dans notre société a entraîné la nécessité de réfléchir à son incidence sur l'écosystème et la société comme telle. Un nombre croissant de preuves démontre que la complexité de problèmes de la gestion de risques et de l'éthique, résultant des applications de la technologie nucléaire, les combustibles fossiles, le clonage humain et les cultures génétiquement modifiées, ne peut pas être attaquée par seulement un raisonnement rationnel, technologique et économique. Pour répondre aux inquiétudes de la société civile, cette complexité a besoin d'une approche transdisciplinaire, compte tenu des aspects sociaux et éthiques.

Étant conscient qu'une compréhension complète des avantages et des risques des applications de la radioactivité et de la technologie nucléaire

requiert également une compréhension du contexte de l'application et une sensibilité des aspects sociaux et éthiques de la situation, le SCK•CEN démarra en 1999 son programme de recherche PISA. Le but de la recherche était (et est encore) de faire mieux comprendre la complexité des aspects sociaux et éthiques des applications nucléaires et en même temps de jeter une lumière nouvelle sur une organisation plus efficace du dialogue et de l'interaction avec la société civile.

Initialement, PISA était construit autour des pistes de recherche thématiques. Des scientifiques nucléaires et sociaux, des ingénieurs et des philosophes étaient impliqués dans le programme qui se concentrait sur des projets spécifiques, exécutés par la voie d'une recherche de doctorats ou de post-doctorat en collaboration avec des universités. Les pistes de recherche se concentraient sur des thèmes tels que *Sustainability and nuclear development*, *Transgenerational ethics of radioactive waste management*, *Legal aspects and liability*, *Risk governance* et *Expert culture*. Outre cette recherche thématique, PISA organisa des groupes de réflexion en interaction avec les universités belges. Ces séances de discussion interdisciplinaires avaient pour but d'échanger des connaissances et des idées sur des problèmes intersectoriels typiques, tels que *Ethical choices in radiological protection*, *Ethics of the expert*, *Involvement* et *Justification*. D'autres se concentraient sur des faits actuels tels que le terrorisme nucléaire[2] et des propositions de la CIPR sur les *basic safety standards* (BSS). Plutôt que d'insister sur une liste approfondie des divers projets exécutés depuis le démarrage du groupe PISA, nous préférons souligner deux projets qui précisent l'approche méthodologique transdisciplinaire, tant de la manière dont les scientifiques et les parties prenantes interagissaient durant le projet, que de la manière dont la science 'comme telle' s'est enrichie par l'input de diverses disciplines.

B. PISA et la recherche internationale

Au niveau international, PISA s'est concentré sur des projets avec une attention particulière pour les aspects sociaux de l'évaluation des technologies. Dans le projet COWAM2 (*Community Waste Management*) du FP6 de la Commission européenne, un appui a été accordé pour l'utilisation des outils participatifs d'évaluation des technologies, dans le contexte de dialogues locaux sur la gestion de déchets radioactifs. La *European Socio-Economic Research on Fusion* (SERF) se concentrait sur l'application de scénarios d'énergie mondiale à long terme comme instruments de communication. Au fil des ans, les scientifiques de PISA ont également observé les processus de négociations internationales au sein

---

[2] Cornelis, Gustaaf & Eggermont, Gilbert (eds.) (2006), *Nucleaire Terreur. Reflecteren over Voorzorg en Ethiek*, Academia Press.

de la Commission des Nations unies du développement durable (CDD) et la Convention-cadre des Nations unies pour les changements climatiques (CCNUCC). D'un point de vue de l'évaluation des technologies participative, nous voyons que les processus de négociations à ce niveau mondial (international) luttent toujours contre le problème d'une autorité représentative versus la participation. Ceci aboutit au fait que les négociations entre les autorités nationales restent entravées, tandis que la participation de grands groupes est reléguée à un niveau d'observation.

C. Orientation et points d'attention futurs

Basé sur l'expérience acquise dans les pistes de recherche thématiques et compte tenu du besoin croissant d'impliquer la société civile dans le processus de décision sur des problèmes sociaux complexes, PISA a décidé en 2006 de se concentrer sur ce thème et sur les aspects liés de la gestion de risques et du processus de décision démocratique. Même aujourd'hui, la science de l'évaluation des technologies sous-estime l'importance de *joint problem framing*, un exercice qui devrait précéder le *joint problem solving* également dans les cas de la politique énergétique et de la gestion de déchets radioactifs. Nous avançons que ce *problem framing* transdisciplinaire peut fournir non seulement la confiance nécessaire dans le processus de négociations comme tel, mais aussi la compréhension de la manière dont des théories délibératives peuvent être pratiquement appliquées dans le « vrai monde ».

VIII. Formation et transmission d'informations

A. Centre de communication pour formation et échange d'informations

Grâce à sa longue expérience dans le domaine des applications pacifiques des sciences et technologies nucléaires, le Centre d'étude de l'énergie nucléaire (SCK•CEN) s'est taillé une excellente réputation non seulement pour la recherche, mais aussi pour l'enseignement et la formation pratique (*Education and Training*, *E&T*).

En tant qu'institution de recherche fédérale, dont le fonctionnement est partiellement financé par des subventions du gouvernement, le SCK•CEN est conscient de son rôle de service envers les autorités et la population. La sincérité envers le monde politique, le monde universitaire et le grand public est poursuivie à tout moment. Bien que, dans le passé, les groupes de recherche du SCK•CEN n'aient pas tous prêté autant d'attention à cette idée, des initiatives louables ont été prises pendant les dernières années par le service Relations publiques et l'école pour la radioprotection (*international school for Radiological Protection*, isRP).

Cette école est un groupe de travail horizontal au sein de la division Radioprotection, dans laquelle les trois piliers fondamentaux d'une bonne politique de communication et de formation ont été introduits :

- la coordination et l'organisation de programmes de formation et d'information ;
- un appui à la politique concernant l'information et la formation appliquées au niveau national et international ;
- la recherche sur les aspects transdisciplinaires de l'information et de la formation.

Depuis la réorganisation, réalisée en automne 2006, une approche plus coordonnée de la politique de communication générale est possible, grâce à la création du groupe d'expertise *Communication, Education and Knowledge Management* (CEK).

Ce groupe s'occupe principalement de la communication scientifique et sa mission principale est de faire mieux connaître les missions, l'expertise et la vision du SCK•CEN, de stimuler la transmission d'informations et d'encourager une culture de débats. Les activités du groupe d'expertise CEK doivent également mener au maintien de notre connaissance, faciliter l'innovation et élargir la base sociale des applications nucléaires. Par la gestion interne des connaissances, des formations, la coordination des cheminements de l'information et l'ouverture aux débats, les activités du CEK s'adresseront tant au monde scientifique qu'au grand public, au sein et en dehors du SCK•CEN, au niveau national et international. La communication du CEK est basée sur l'expertise scientifique et technique du SCK•CEN et repose sur une approche transdisciplinaire et une réflexion continue sur la position et les objectifs poursuivis du SCK•CEN.

Cette vision se reflète dans les différentes unités fondées au sein du groupe CEK :

1. Education & Training *(E&T) et* Science & Society *(S&S)*

Outre les publications dans des magazines scientifiques et la participation aux conférences, groupes d'expertise et débats, l'engagement du CEK offre l'opportunité de publier l'expertise du Centre. Cet engagement peut se trouver tant au niveau exécutif (organiser des formations ou donner des cours aux écoles supérieures et aux universités) qu'au niveau politique (participation aux réseaux). E&T contribue au maintien et au transfert des connaissances et de l'expertise dans le domaine nucléaire. Outre les connaissances purement techniques et scientifiques, nous prêtons également une attention à l'impact de la technologie nucléaire sur l'homme et l'environnement et à ses aspects sociaux ; ces derniers sont examinés au sein du S&S. On y prête également une attention aux trois

piliers fondamentaux mentionnés ci-avant, introduits par l'isRP et ultérieurement transmis et appliqués pour tous les domaines d'expertise, outre la radioprotection, dans lesquels le SCK•CEN travaille.

2. Appui à la politique

L'introduction d'une approche cohérente pour l'information et la formation est d'une importance capitale dans un monde où les marchés sont constamment en évolution et les travailleurs de plus en plus mobiles. Au moyen des réseaux et des programmes internationaux, le SCK•CEN essaye de contribuer à l'harmonisation de l'information, de la formation et de la reconnaissance des compétences au niveau national et international.

Le SCK•CEN participe, avec 6 universités belges, au *Belgian Nuclear higher Educational Network* (BNEN), qui garantit la formation universitaire d'ingénieurs nucléaires (voir chapitre sur la formation). Ce réseau servait de modèle pour ENEN, le réseau européen dont le SCK•CEN a jeté les fondements.

Dans l'offre E&T du Centre, outre « *nuclear engineering* », d'autres domaines d'expertise sont représentés. Quelques exemples sont donnés plus bas. Dans ces domaines d'expertise, le SCK•CEN est impliqué dans des réseaux internationaux tels que ENETRAP et EUTERP.

Pour les formations, le SCK•CEN met ses installations à disposition pour la formation des étudiants.

3. Coordination et organisation de programmes de formation et d'information

Les formations du SCK•CEN s'adressent au secteur nucléaire industriel, privé et médical, aux organisations de politique nationales et internationales, aux politiciens, aux scientifiques et au grand public. Les formations sont également organisées en collaboration avec les écoles supérieures techniques, les universités et les services de santé publics et privés. En outre, le SCK•CEN participe à des programmes de formation internationaux de la Commission européenne et de l'AIEA.

4. Recherche sur les aspects transdisciplinaires d'information et de formation

Pour comprendre les avantages et les risques de la radioactivité, il nous faut outre une connaissance technique et une formation, avoir une approche du contexte et une certaine sensibilité des aspects sociaux et philosophiques de la situation. On examine avec le secteur universitaire l'intégration de cette approche transdisciplinaire dans des programmes d'information et de formation pour des professionnels, étudiants, élèves et le grand public. Cette recherche est effectuée par le groupe d'expertise

CEK, en étroite collaboration avec le groupe PISA, dont une description est donnée dans le paragraphe précédent.

B. Quality Assurance

Le système de gestion de qualité (QA ou *Quality Assurance*) a pour but de garantir un niveau de qualité durable pour l'output du SCK•CEN, tant pour les publications scientifiques, les résultats d'analyses et les services techniques, que pour des produits livrés tels que des radioisotopes et des irradiations. En 1993, sous la pression de clients externes, la *Quality Assurance* est introduite dans trois laboratoires de routine au SCK•CEN. Entre-temps, ce système englobe une vingtaine de groupes, non seulement dans des laboratoires de routine, mais également dans des laboratoires et projets de recherche, ainsi qu'au sein d'environnements de services ou de production tels que le BR2.

Depuis 1995, le succès de l'introduction du système de qualité est approuvé et reconnu par des organisations nationales telles que Beltest et OBE, les Organisations belges d'accréditation et d'étalonnage, à présent unies et connues sous le nom de BELAC. Cette reconnaissance est accordée par une accréditation et une certification pour la conformité du système de qualité avec une certaine norme telle que ISO 17025 en cas de mesures, analyses et étalonnages, ou ISO 9001 pour la fourniture de produits matériels, tels que des radioisotopes et du silicium dopé pour l'industrie microélectronique. Il y a peu de temps, on a aussi obtenu une reconnaissance CEFRI pour la réalisation de travaux dans des installations nucléaires en France. Un nombre croissant d'activités et de services au sein du SCK•CEN relève du système de qualité, ce qui est de plus en plus souhaité pour pouvoir participer à des projets internationaux. Le SCK•CEN fait des efforts pour également obtenir la norme ISO 14000 concernant la gestion environnementale.

Pour l'ensemble du système de qualité, comprenant plus de 1 000 procédures, un site web a été créé qui est utilisé comme source d'information, de training et de communication pour le personnel. Ce système est également complété avec un système automatique pour l'enregistrement de non-conformités, de plaintes et d'audits, et pour le suivi de mesures correctives et préventives.

Outre un niveau de qualité durable et prévisible de la recherche, des services et des produits, ce système mène certainement à une meilleure traçabilité de données, une précision de l'organisation interne, une culture ouverte et transparente, une discussion sur l'organisation interne et un enrichissement de la connaissance technique des méthodes de recherche et d'analyse.

Le système de qualité comprend également un certain nombre d'objectifs, dont des objectifs généraux à long terme pour le SCK•CEN et des objectifs spécifiques annuels. Les objectifs généraux concernent l'effectif du personnel, la formation continue, la production scientifique, la gestion de projets et l'utilisation des moyens mis à disposition par les autorités pour des investissements prévisionnels et d'infrastructure lourde. Le rapport annuel « Gestion de la qualité » donne un aperçu des activités et réalisations dans ce cadre, ainsi que de la mesure dans laquelle ces objectifs ont été réalisés. Un entretien et un examen au niveau des instituts et de la direction générale stimulent la transmission verticale de l'information et la prise de décisions de gestion aux divers niveaux. De cette manière, on peut répondre de manière durable aux exigences des autorités de tutelle et des clients.

L'Institut national des radioéléments (IRE), MDS Nordion s.a. et Sterigenics

Henri BONET

Directeur général de l'IRE

À l'aube du 20e siècle, la science identifie les effets de la radioactivité naturelle et des rayonnements ionisants et dès les années 1930 l'homme met en évidence la possibilité de fissionner l'atome et de produire des radioéléments artificiels.

L'espoir naît de pouvoir utiliser ces sources de rayonnement en médecine et l'intérêt de disposer de radioéléments de courte voire de très courte durée de vie s'impose pour les applications médicales. En moins d'un demi-siècle l'évolution de la science allait permettre une première application médicale faisant usage d'un radioisotope artificiel, l'^{131}I expérimenté dès 1942. La médecine nucléaire est née et la mission de l'IRE se dessine : mettre à la disposition de l'homme et promouvoir l'utilisation des radioéléments pour contribuer à son bien-être et en particulier à sa santé tout en veillant à la protection de l'environnement et des populations. Dès les années 1950, René Constant s'intéresse à cette science nouvelle pleine de promesses pour le bonheur de l'humanité. Il aborde la science nucléaire en faisant des études de chimie à l'ULB. Il y occupera d'ailleurs par après, ainsi que dans d'autres établissements d'enseignement supérieur, la chaire de Radiochimie. En 1955, il fait partie du noyau qui va constituer le Centre d'études nucléaires de Mol (SCK•CEN) et il effectue différentes missions d'étude aux États-Unis et au Canada. Il crée au SCK•CEN un service qui se lance dans l'étude des productions de radioéléments artificiels. En deux ans une méthode originale de production de l'^{131}I est mise au point et brevetée. Elle aura son heure de succès tant en Europe qu'en Amérique et en Asie. Le service bénéficie de l'infrastructure développée au SCK•CEN pour la recherche fondamentale et le développement de l'énergie nucléaire, avec comme points forts les réacteurs BR1 puis plus tard le BR2. Mais la priorité n'est pas donnée aux investissements pour la production de radioéléments car, à cette époque, le secteur nucléaire est avant tout préoccupé des applications énergé-

tiques. De son côté, René Constant et ses collaborateurs découvrent de vastes domaines d'application non seulement en médecine et en biologie, mais aussi dans l'industrie et dans diverses branches de la recherche et de l'étude de l'environnement. Son service connaît un développement de productions de type industriel qui ouvrent des perspectives commerciales prometteuses.

Dans les années 1960, l'intérêt d'assurer un développement industriel et commercial éloigné des préoccupations d'un centre de recherche se précise et l'idée germe de créer une institution spécialisée dans tout ce qui gravite autour de l'utilisation des radioéléments, comme cela se produit d'ailleurs dans nombre d'autres pays. Surmontant les difficultés politiques, la fondation de l'Institut national des radioéléments (IRE) est obtenue le 20 août 1971. L'IRE reprend les activités du service des Radioéléments du SCK•CEN et entame d'abord son existence autonome sur son site, se liant à lui par des conventions assurant une collaboration entre les deux institutions tout en évitant une concurrence et des duplications au niveau du pays. L'IRE installera ensuite son siège d'exploitation à Fleurus, sur un terrain qui s'étendra bientôt sur 46 hectares, partie d'un zoning industriel naissant et dont l'adresse, rue de l'Espérance, constitue en soi tout un programme.

René Constant est nommé directeur général de l'Institut et il en assurera la direction jusqu'à sa retraite en décembre 1991. Lui qui fut l'âme de l'IRE et le maître d'œuvre de son développement fulgurant, il ne pouvait abandonner le combat alors qu'en 1990, en conséquence des réformes institutionnelles, on avait obligé l'IRE à se défaire d'une grande partie de ses activités. En lui confiant la présidence du conseil d'administration on allait lui permettre de contribuer avec toutes ses connaissances et toute son énergie, à la relance du développement d'un Institut encore plein de ressources. Avant de s'éteindre le 18 octobre 2004, René Constant avait pu célébrer le 30e anniversaire de l'Institut et se réjouir du chemin parcouru les dernières années.

Dès sa création, l'IRE prend la forme d'un établissement d'utilité publique de droit privé, comme le SCK•CEN, mais la nature industrielle et commerciale d'une grande partie de son activité est reconnue et le soumet aux mêmes obligations notamment fiscales que toute autre industrie privée. L'IRE qui a la vocation d'un développement à l'échelle européenne, poursuit les accords de collaboration avec d'autres institutions et notamment l'association créée avec le CEA et SORIN, qui prendra le nom de CIS, prélude de la création dans les années 1980 de la société CIS Bio International.

Dès 1972, la grande aventure de l'IRE commence par la construction progressive de ses installations, le transfert du personnel, plus de 30 agents

rejoignent Fleurus, et se poursuit par la recherche de nouvelles applications et le développement de nouvelles productions.

L'IRE développe des trousses biomédicales pour l'analyse *in vitro*, faisant usage de la grande sensibilité de détection de molécules marquées avec des radioisotopes. À l'avant-garde ou même en premières mondiales, l'IRE met sur le marché des trousses de dosage d'hormones telle que la prolactine, et plus tard, il développe avec succès une trousse de dosage qui se base déjà sur l'usage d'anticorps monoclonaux. Il poursuit dans le domaine de la radioimmunologie une collaboration enrichissante avec les équipes du professeur Franchimont et madame Reuter de l'ULg.

En 1990 les activités d'analyse *in vitro* ou *Radioimmunoassay* (RIA) reprises par MEDGENIX DIAGNOSTIC SA se poursuivront dans les bâtiments loués à l'IRE.

La société sera reprise par NORDION EUROPE SA en 1992 qui cèdera en 1996 l'activité de radioimmunologie à la société américaine BIOSOURCES. Celle-ci décidera en 1998 de transférer ses installations à Nivelles sur un site non nucléaire afin de réduire les coûts fixes d'exploitation.

Pour les applications industrielles, l'IRE développe une gamme importante de sources radioactives scellées faisant usage des radioéléments tels que ^{241}Am, ^{137}Cs, ^{60}Co, ^{192}Ir. Ce dernier isotope produit sous forme de fil, utilisé comme implant dans des traitements médicaux, représentait une des premières applications de la brachythérapie, technique popularisée aujourd'hui en faisant usage de ^{103}Pd ou de l'^{125}I, notamment par la société IBt installée à Seneffe.

L'expertise de l'IRE en matière de sources scellées allait aussi orienter ses activités dans un tout autre domaine. L'IRE inaugure en 1978 son département MEDIRIS, qui comporte deux irradiateurs constitués de sources ^{60}Co, dont le rayonnement γ est utilisé pour différentes applications de stérilisation. Cette installation encore unique en Belgique mais qui a ses homologues dans de nombreux pays de la planète, a apporté une contribution remarquable à la protection de la santé de l'homme au cours des dernières décennies. Cette technique est utilisée pour une stérilisation poussée du matériel médico-chirurgical et pharmaceutique. Elle permet d'améliorer la qualité bactériologique des denrées alimentaires, assurant leur conservation et une distribution dans la chaîne alimentaire avec une plus grande sécurité pour la santé des consommateurs. Ce traitement est recommandé par l'Organisation mondiale de la santé pour certains aliments à haut risque. Bien qu'encore controversés par certains, les traitements de radiostérilisation des aliments par rayonnements β, γ ou X connaissent aujourd'hui dans divers pays et en particulier aux États-Unis un regain d'intérêt certain. Mais l'installation MEDIRIS a innové bien

d'autres applications et si vous visitez le Château de Seneffe, vous apprécierez la contribution de l'IRE à la préservation de notre patrimoine historique menacé par la mérule. Dans le cadre de la régionalisation d'une partie de la tutelle de l'IRE, le département va connaître une vie nouvelle et autonome.

Le 26 novembre 1990, l'Institut national des radioéléments, Sambrinvest, les laboratoires français Caric et Pérouse ont créé la société anonyme Caric MEDIRIS, prestataire de services en traitement par les rayonnements ionisants, l'IRE y conservant une participation minoritaire. Sa création est l'association de plus de 15 ans d'expérience de l'unité MEDIRIS de l'IRE en traitement par rayonnement gamma, avec plus de 20 ans d'expérience des Laboratoires français Caric et Pérouse en traitement par faisceau d'électrons accélérés et la concrétisation d'une collaboration naturelle de deux activités complémentaires. Puis en août 1997, la société Griffith rachète les parts des laboratoires français, et devient Griffith MEDIRIS. En janvier 2001, Ion Beam Applications (IBA) rachète les parts de Griffith, et la dénomination de la société devient IBA MEDIRIS. En décembre 2004, IBA revend ses parts à PPM et la société devient Sterigenics Belgium Fleurus.

En mars 2006, suite à un incident technique un travailleur subira une très forte irradiation. Suite à un traitement intensif à l'hôpital de Percy (Paris), il pourra reprendre après quelques mois une activité professionnelle au sein de Sterigenics alors que la société adaptait ses installations pour empêcher le renouvellement d'un tel incident.

Elle occupe actuellement 36 personnes et envisage une extension de ses installations. Son chiffre d'affaires au 31 décembre 2006 s'élevait près de 4 millions d'euros pour un volume traité de 75 000 m^3.

En parallèle, l'IRE développait nombre d'autres applications, faisant usage de radioéléments comme traceurs permettant la mesure de quantités infimes par rapport aux méthodes classiques, certaines utilisées dans l'industrie et d'autres en recherche en matière environnementale. Pour ce dernier aspect, on peut citer le traçage des mouvements des bancs de sable réalisés par l'IRE à la Côte belge.

En 1974, débute la construction d'installations lourdes, épine dorsale des équipements de production radiochimique et radiopharmaceutique, principalement basées sur la production de radioisotopes, produits de la fission de l'uranium ou de l'activation de matériaux en réacteur. Cette réalisation de deux lignes de cellules chaudes aux murs épais, équipées de vitres au plomb et de télémanipulateurs, se fera en étroite collaboration avec la firme ROBATEL. Dans ces installations, l'IRE développera un procédé des plus performants au monde, pour l'extraction de 3 produits de la fission de l'uranium, le ^{99}Mo, l'^{131}I et le ^{133}Xe. Il procède ensuite à

leur purification et leur conditionnement en produits radiopharmaceutiques dans des zones stériles qui ont été conçues en conformité avec la pratique de l'industrie pharmaceutique.

Pour l'irradiation des cibles d'uranium, l'IRE fera appel au BR2 de Mol, mais par la suite également aux réacteurs HFR, OSIRIS, SILOE puis enfin au FRJ-2, ces deux derniers réacteurs ayant été mis à l'arrêt aujourd'hui. Le dédoublement des lignes de productions, l'accès à des réacteurs sur des sites différents et toute l'approche logistique allaient permettre à l'IRE de disposer d'un outil de production particulièrement fiable de par la redondance et la diversité des moyens mis en œuvre. Cela donne à ses clients une grande sécurité d'approvisionnement en ^{99}Mo, isotope dont l'activité diminue de 23 % par jour et ne peut donc être stocké. Cet isotope est essentiel pour la médecine nucléaire. Introduit dans un générateur du type de celui conçu par l'IRE, il livre au médecin sa fille de décroissance, le ^{99m}Tc, isotope utilisé dans 80 % des diagnostics de médecine nucléaire, dans des applications aussi variées que la cancérologie, la cardiologie, voire la neurologie. À lui seul, il est utilisé dans le monde pour plusieurs dizaines de millions d'examens chaque année, et très rapidement l'IRE en deviendra un des principaux producteurs.

La disponibilité permanente des générateurs ^{99}Mo/^{99m}Tc dans les hôpitaux constitue en fait le point le plus vulnérable de la médecine nucléaire. Ils doivent être disponibles 365 jours par an non seulement pour la réalisation d'examens programmés mais aussi pour faire face à des interventions en urgence. La production du ^{99}Mo et son expédition aux quatre coins de la planète sont critiques, car il n'y a dans le monde aujourd'hui que 4 producteurs importants (95 % de la production) d'isotopes de fission faisant usage de seulement 5 réacteurs dont la localisation et les caractéristiques techniques sont appropriées. La sécurité d'approvisionnement du ^{99}Mo est d'autant plus difficile à satisfaire que :

– d'une part, pour des raisons techniques, les réacteurs de recherche « à usages multiples » n'ont généralement pas une disponibilité annuelle supérieure à 60 % et ceux principalement dédiés à la production de radioisotopes atteignent difficilement plus de 85 % de disponibilité en raison de multiples contraintes techniques ;

– d'autre part, une production réalisée en flux tendu, dépendant de la durée d'irradiation en réacteur, des temps de production radiochimique et des conditions et aléas de transport, est très vulnérable vis-à-vis de tout retard ou tout incident intervenant sur le chemin critique.

Dès lors différentes stratégies ont été développées par les producteurs :

a) l'IRE s'est assuré la redondance et la diversité des sources d'irradiation en faisant usage de 3 à 4 réacteurs situés dans un rayon de 300 km

de son site, ce qui minimise la pénalité relative au transport. Les autres producteurs ne disposent en général que d'un réacteur sur leur site.

b) Afin de sécuriser l'approvisionnement en Europe, un groupe de travail a été créé au sein de l'AIPES (*Association of imaging producers & equipement suppliers*), regroupant les principales sociétés assurant le « conditionnement des radioisotopes » et les principaux opérateurs de réacteurs « fournisseurs de services d'irradiation » en Europe. Cette structure coordonnée aujourd'hui par l'IRE s'attache en particulier à optimiser les périodes de fonctionnement des différents réacteurs afin d'éviter les « trous » de production, de rendre possible mais de limiter les nécessités d'appel au back up des autres producteurs et de gérer les situations de crises telles que celles causées par l'arrêt imprévu d'un réacteur ou de perturbations dans les conditions de transport. Dans ce cadre, le SCK•CEN a accepté d'optimiser tant que peut et en tenant compte des périodes d'arrêt des autres réacteurs, les périodes d'opération du réacteur BR2 qui sont généralement limitées à 5 cycles de 21 jours par an.

c) L'IRE a conclu des accords avec NECSA-NTP qui opère en Afrique du Sud le réacteur SAFARI et une installation très moderne de production de radioéléments, ceci afin d'assurer conjointement les fournitures de plusieurs clients et assurer les *backups* de productions. Par ailleurs, l'ensemble des producteurs ont également signé des accords de back up réciproques pour assurer des fournitures en cas de besoin.

Néanmoins, en dépit de ces accords et d'une capacité de production théorique dépassant 150 % des besoins mondiaux, la sécurité d'approvisionnement en ^{99}Mo reste très sensible à tout arrêt intempestif d'un des principaux réacteurs et la situation deviendrait très tendue en cas d'arrêt de longue durée ou définitif.

Dans ce contexte, l'IRE s'est intéressé de près au développement de nouvelles sources d'irradiation qui pourraient constituer des alternatives pour le remplacement des réacteurs de recherche vieillissants.

Dès 1995, l'IRE s'associait à Babcock & Wilcox dans un programme de recherche pour l'extraction en continu de ^{99}Mo à partir du combustible en solution dans un réacteur homogène de faible puissance. En dépit de premiers résultats prometteurs à l'échelle laboratoire quant à la chimie du procédé d'extraction et de purification, en 1997 Babcock & Wilcox abandonnait le programme de recherche. L'IRE a poursuivi l'étude du concept avec une autre firme américaine TCI qui travaillait avec l'Institut Kurchatov de Moscou qui opère un réacteur homogène depuis plusieurs années, mais l'analyse de la qualité du produit obtenu et la gestion du projet ne se sont pas révélés convaincantes.

En parallèle l'IRE a suivi le développement entrepris conjointement par le SCK•CEN et IBA, d'un projet de réacteur souscritique ADS (*Acce-*

lerator Driven System) destiné à la production de ^{99}Mo en faisant usage des cibles d'uranium standard de l'IRE (projet ADONIS). Ce projet arrivait trop tôt car il nécessitait encore de nombreux développements notamment dans la conception de la source de spallation Pb-Bi, et son étude évoluera vers un projet plus ambitieux MYRRHA dont le spectre des applications est beaucoup plus large mais dont la réalisation nécessite encore de nombreuses années de travail.

Dès lors, l'IRE avait mis à l'étude, avec en particulier la collaboration de SIEMENS, la possibilité de construire un réacteur de type piscine, de conception éprouvée et très simple, très sûre et fiable, spécialisé dans la production d'isotopes de fission avec des arrêts limités à quelques jours par an. Ce projet MING (*Medical Isotope Neutron Generator*) a fait l'objet d'une étude économique poussée qui confirme son intérêt bien que le niveau de l'investissement soit important. Ce projet pourrait rapidement être remis sur la table si le besoin s'en faisait sentir, mais en attendant l'IRE a poursuivi des discussions pour pouvoir installer des dispositifs d'irradiation dans la nouvelle génération de réacteurs de test en Allemagne (FRM-II) et en France (JHR).

Au début des années 1980, l'IRE était également devenu un des premiers producteurs d'^{131}I produit par fission, isotope très demandé pour la thérapie tant que pour le diagnostic et du ^{133}Xe, isotope d'applications plus limitées.

Ces isotopes ainsi que le générateur ^{99}Mo/^{99m}Tc étaient produits dans des conditions radiopharmaceutiques et l'IRE avait également développé la production de kits froids, ces molécules nécessaires pour acheminer et concentrer l'isotope tel que le ^{99m}Tc dans l'organe à examiner.

Alors qu'en 1990 suite à la régionalisation d'une partie de sa tutelle, l'IRE était amené à limiter ses productions à celle du ^{99}Mo purifié de qualité radiopharmaceutique et à céder à NORDION ses activités radiopharmaceutiques et la purification de l'^{131}I et du ^{133}Xe, à cette époque l'IRE consacre le plus gros de ses efforts à l'amélioration de la productivité, à la réduction des rejets radioactifs et à l'élimination des facteurs affectant la fiabilité de ses productions, ceci afin de devenir particulièrement compétitif sur la partie amont du marché où les marges sont particulièrement réduites. Ceci est l'œuvre de Jean Finn qui est nommé directeur général de l'Institut en 1992 et qui s'est donné comme objectif de mettre en œuvre les actions de préservation de l'actif et de redéploiement des activités de l'IRE. Quand en 1997, Henri Bonet prend sa succession de nombreux projets sont en chantier mais l'IRE perçoit la nécessité de remettre sur pied un groupe R&D en radiochimie, dont l'objectif premier serait d'étudier les possibilités de diversification de ses productions de radioéléments en réponse aux nouvelles attentes de la médecine nucléaire en particulier dans le domaine de la thérapie. Très rapidement un nouveau

procédé de production et de purification de l'^{131}I est mis au point et l'IRE peut reprendre une position importante sur ce marché grâce à la qualité de son produit et à une bonne productivité.

Ceci le conduit à investir dans une nouvelle chaîne de cellules de production dont la conception correspond au « *state of the art* » et qui sont opérationnelles aujourd'hui.

L'IRE met également au point un procédé d'extraction du ^{90}Sr à partir de ses résidus d'uranium qui après un stockage de minimum 3 ans ne comportent plus les autres isotopes du Sr. Ce procédé conduit au recyclagede nos vieux déchets, une mine d'or si on peut en valoriser un des éléments résiduels et il constitue une deuxième étape de purification de l'uranium irradié. En prolongation à cette étape, le procédé de purification finale de l'uranium est à l'étude en vue de la réutilisation de cette matière première pour la fabrication de cibles, ce qui non seulement allègera les préoccupations relatives au stockage final des déchets de production mais résoudra ainsi un éventuel problème d'approvisionnement en uranium hautement enrichi. L'IRE développe actuellement les plans de réalisation d'une chaîne de cellules pour installer l'ensemble de ce procédé.

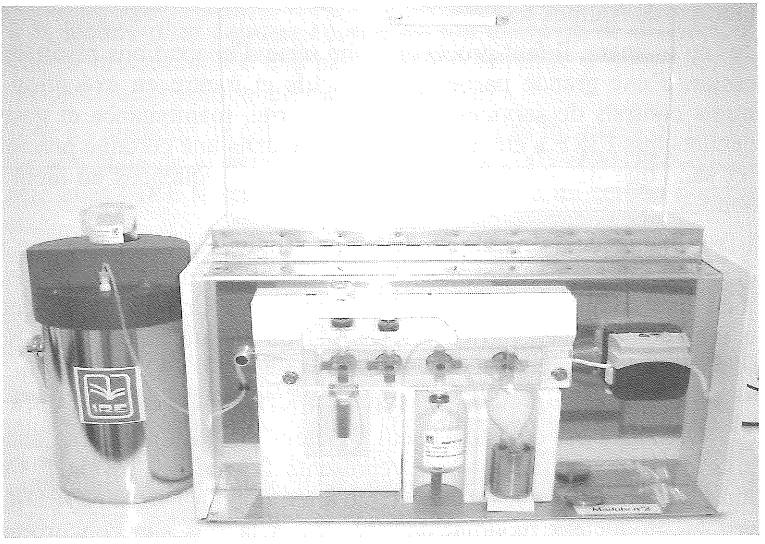
Le ^{90}Sr a comme fille de décroissance l'^{90}Y, émetteur β qui s'avère très prometteur pour la thérapie de différents cancers. Un médicament marqué à l'^{90}Y, pour le traitement de lymphomes non hodgkiniens a d'ailleurs reçu l'autorisation de mise sur le marché par la FDA aux États-Unis dès 2002. Différents clients dont en particulier CIS Bio International sont intéressés à ce que l'IRE devienne dès 2004 leur fournisseur alternatif sous forme radiochimique de cet isotope dont la demi-vie est de 64 heures. En effet, la production d'un générateur ^{90}Sr /^{90}Y n'est pas une solution viable en milieu hospitalier étant donné la longue demi-vie (29,5 ans) du ^{90}Sr et surtout sa radiotoxicité élevée.

À cette fin, l'IRE met au point une nouvelle technique d'extraction liquide-liquide qui permet de produire l'^{90}Y de façon tout à fait satisfaisante tant du point de vue pureté radiochimique que chimique, pureté indispensable pour l'incorporation du radioisotope dans la molécule injectable. Mais très vite nos clients marquent leur intérêt pour que nous produisions cet isotope, ingrédient actif d'un produit injectable, sous forme de produit de qualité radiopharmaceutique.

À la même époque, le SCK•CEN lance un programme d'étude relatif à la production du ^{188}W et l'utilisation de sa fille le ^{188}Re, programme auquel l'IRE s'associe, intéressé au développement d'un générateur ^{188}W/^{188}Re de qualité industrielle et radiopharmaceutique. Le SCK•CEN est intéressé par le fait que la production du ^{188}W par double capture neutronique nécessite l'irradiation dans un réacteur à très haut flux neutronique parmi lesquels on compte le BR2 et seulement 3 autres réacteurs

dans le monde (USA, Russie et Chine) à défaut de disposer de nouveaux outils tels que MYRRHA. Le ^{188}Re est un isotope de courte demi-vie (17 heures), émetteur β faisant l'objet de très nombreuses recherches dans le domaine de la thérapie notamment du cancer, mais présentant également un rayonnement γ intéressant pour localiser l'isotope mais nécessitant une protection radiologique renforcée. Autre difficulté, l'activité volumique de la solution injectable n'étant pas toujours suffisante pour les applications médicales, il faut associer au générateur un automate de reconcentration de l'éluat.

Figure 1 : Générateur ^{188}W /^{188}Re et module de concentration



L'IRE fournit les premières doses de ^{188}Re à l'Université de Gand dès 2002 et développe un générateur et son automate de concentration pour la production d'un produit radiopharmaceutique, c'est-à-dire stérile et apyrogène dont la fabrication doit répondre aux exigences des techniques pharmaceutiques, c'est-à-dire zones propres, flux laminaires, autoclavage et assurance de la qualité conformes aux bonnes pratiques de fabrication.

En vue de redevenir le premier producteur mondial de ce générateur sous forme radiopharmaceutique et de pouvoir également fournir l'^{90}Y directement sous forme radiopharmaceutique à ses clients, l'IRE lance dès 2003 un important programme d'investissement pour construire un nouveau bâtiment, réaménager des laboratoires existants, installer de nouvelles chaînes de production et développer les procédures conformes aux exigences radiopharmaceutiques pour la production dès 2008 tant de

l'^{90}Y que du générateur ^{188}W/^{188}Re. Ces investissements peuvent ultérieurement être étendus à l'installation de moyens de production d'un à trois produits radiopharmaceutiques additionnels. Redevenir aujourd'hui un producteur radiopharmaceutique orienté en particulier sur les produits à usage thérapeutique est pour l'IRE un challenge car les exigences tant en matière de sécurité nucléaire des productions que de qualité pharmaceutique des produits n'ont cessé d'évoluer ces dernières années et la culture de la société doit s'y adapter.

L'IRE a en effet cédé à Nordion en 1990, la partie radiopharmaceutique de ses activités : fabrication des générateurs ^{99}Mo/^{99m}Tc, des *cold kits*, des productions ^{131}I/^{133}Xe et des isotopes de cyclotron, ainsi que des productions de sources scellées.

Dès ce moment, il faut procéder à une série d'adaptations résultant de la cession d'une grande partie de nos actifs et mettre en exécution les différents contrats de services, services sécurité, maintenance et gestion des déchets que l'IRE a été amené à conclure dans une certaine précipitation et sans que de part et d'autre toutes les conséquences en aient été pressenties.

Il faut établir des séparations dans des activités qui au départ ne faisaient qu'un tout, il faut préciser les responsabilités de chacun et mettre au point une comptabilité analytique complexe pour répartir les coûts. Cette situation est génératrice de conflits qu'encore aujourd'hui nous nous attachons à éliminer.

D'autre part, avec le rachat de MEDGENIX DIAGNOSTICS SA en 1992, NORDION est devenu le seul acheteur des radioéléments encore produits par l'IRE dont la vente représente 2/3 de ses revenus. Cette situation de dépendance n'est pas viable à terme pour l'IRE. NORDION, le premier producteur mondial de ^{99}Mo est à la fois son concurrent et depuis peu son seul client.

Durant les 15 années suivantes, l'IRE s'attachera à obtenir de nouveaux clients qui y voient une convergence d'intérêt pour diversifier leurs sources d'approvisionnement, ceci en commençant par MALLINCKRODT MEDICAL (aujourd'hui TYCO HEALTHCARE) qui en 1997 n'a pas hésité à confier un contrat important à un consortium IRE-NECSA/NTP, tout en démarrant ses propres productions de ^{99}Mo sur son site de Petten (NL). L'IRE réussissait ainsi à réduire sa dépendance vis-à-vis de NORDION, tout en préservant l'avantage d'un contrat de back-up réciproque pour la fourniture de ^{99}Mo. L'IRE et NORDION connaîtront sur le site de Fleurus une évolution très différente :

Le 29 novembre 1990, NORDION concluait le rachat d'une partie importante des actifs de l'IRE et s'installait sur le site de Fleurus. Il reprenait une partie du personnel de l'IRE et signait avec lui des contrats

de location des bâtiments, de services en matière de sécurité, de maintenance et de gestion des déchets. Il signait également un contrat d'achat de ^{99}Mo et du produit de base pour la production d'^{131}I et ^{133}Xe.

Le 1er avril 1992 NORDION EUROPE SA a acquis MEDGENIX DIAGNOSTICS SA et le 5 juin 1996 il cédait certains actifs et passifs de cette filiale à la société BIOSOURCES EUROPE SA à laquelle il transférait le personnel.

Le 23 janvier 1997, NORDION EUROPE SA change de raison sociale et devient MDS NORDION SA.

Le 17 septembre 2003, la direction a convoqué, en vertu de la loi Renault, une réunion extraordinaire du Conseil d'entreprise afin de procéder à la lecture d'un courrier annonçant son intention de discuter d'une possible restructuration d'une partie de ses activités, à savoir les radiopharmaceutiques traditionnels ou diagnostiques.

Suite à l'abandon de ces activités, le départ des membres du personnel concerné s'étale de septembre 2004 à octobre 2005 et MDS NORDION négocie avec l'IRE la rétrocession de la location d'un certain nombre de locaux.

En 2007, MDS NORDION a annoncé son intention de procéder à des investissements qui lui permettront de réorienter une partie de ses activités vers la production d'isotopes PET.

Après ce détour revenons à la fin des années 1970 et à la production des radioéléments que l'IRE se devait de développer en réponse à la demande de la médecine nucléaire à la recherche d'isotopes de très courte durée de vie et d'isotopes qui comme l'^{123}I ne pouvaient être produits qu'en cyclotrons, ces accélérateurs de particules qui servaient notamment à la recherche dans nos universités. Les premières productions se feront en collaboration avec les universités de Louvain-la-Neuve, de Liège et de Gand, avant que l'IRE puisse installer sur son site un premier cyclotron qui sera inauguré en 1984.

L'IRE dispose à ce moment de l'outil dont il a besoin pour assurer son avenir sur le site de Fleurus, mais il s'intéresse à ce qui se passe à l'extérieur, ce qui me conduit à faire une courte digression pour vous parler d'une société, à la création de laquelle l'IRE a contribué.

Au cours de sa collaboration avec l'UCL, l'IRE avait fait la connaissance d'un spécialiste de la physique des cyclotrons faisant preuve d'un débordement d'idées et de dynamisme. Yves Jongen vient d'inventer un tout nouveau concept de mini-cyclotron, nettement en avance sur les machines disponibles à l'époque par sa souplesse d'utilisation, sa productivité et sa consommation d'énergie. Aussi quand, après avoir essuyé le refus de collaboration des grands producteurs de cyclotrons de l'époque, Yves Jongen présente son intention de créer une société pour la produc-

tion et la commercialisation de cette machine révolutionnaire, il n'aura aucune difficulté à convaincre René Constant d'associer l'IRE à l'UCL en tant qu'actionnaires principaux de la société *Ion Beam Applications* (IBA) qui est créée en mars 1986. C'est le début d'une longue aventure à laquelle l'IRE est resté lié au cours de ces 20 dernières années. IBA parvient rapidement à s'imposer en s'emparant de 90 % du marché mondial du cyclotron et très tôt l'IRE envisage l'acquisition d'un Cyclone 30 pour son site de Fleurus. Au cours des années difficiles de démarrage d'une société de haute technologie, l'IRE soutient le développement d'IBA et lui suggère notamment d'examiner l'intérêt d'acquérir la licence d'un nouveau type d'accélérateur d'électrons, imaginé par le CEA. Après des années de développement, le Rhodotron est parti aujourd'hui à la conquête du marché mondial de la stérilisation par courant d'électrons ou rayons X, et peut-être, peut-on rêver d'en voir un jour un exemplaire sur le site de Fleurus dans les installations de ce qui deviendra un jour IBA-MEDIRIS avant de devenir Sterigenics Belgium.

L'IRE se veut de rester un actionnaire de référence fidèle d'IBA et il soutient sa direction au moment d'une restructuration difficile de son actionnariat. IBA entre en bourse en 1998. Le succès se révèle inespéré, IBA devient une des vedettes technologiques de la Wallonie entrant dans le BEL20, et occupant à ce jour plus de 1 000 agents dans le monde. Plus récemment encore, l'IRE et IBA identifient l'intérêt d'approfondir les synergies entre leurs activités. IBA développe un nouveau concept de cyclotron et c'est tout naturellement qu'il s'entend avec l'IRE pour installer sur le site de Fleurus une nouvelle filiale IBA-Radioisotopes qui y mettra au point le prototype d'un nouveau type de cyclotron. Cette installation est devenue aujourd'hui le centre de recherche européen d'IBA notamment en matière de développement de produits TEP (Tomographie par émission de positons) avant d'entamer des productions radiopharmaceutiques.

Pour cette réalisation prometteuse de développements, IBA-Radioisotopes pourra bénéficier de tout le support des services techniques et de l'expertise de l'IRE.

Au cours de ces dernières années, la collaboration entre IRE et IBA n'a cessé de se développer pour arriver à un point culminant quant en avril 2005, IBA nous invite à se joindre à une négociation avec le groupe Schering AG qui avait acquis la société CIS Bio International en 2000 et souhaitait rapidement la céder devant le risque d'une OPA hostile. Après des négociations intensives, le 26 février 2006, IRE et IBA annoncent l'acquisition pour 1 euro, par Radiopharma Partners, société détenue à 80,1 % par IRE et 19,9 % par IBA, de la totalité des actions de BIS Bio International et de ses activités aux USA et au Japon.

CIS Bio avec un effectif de 750 agents a développé à Saclay une importante production radiopharmaceutique à usage diagnostique et thérapeutique, il exploite un réseau de 6 installations de production TEP-FDG en France et opère à Marcoule des activités dans le domaine du diagnostique *in vitro* (RIA et ELISA) et du criblage à haut débit (HTS), activité en forte croissance qui intéresse l'industrie pharmaceutique à la recherche de nouvelles molécules.

L'IRE a un intérêt stratégique à entrer dans un réseau de trois sociétés qui présentent des complémentarités évidentes qui permettent de développer des synergies tant au niveau de la R&D, du développement des moyens de production en particulier radiopharmaceutique, des activités de support (sécurité, maintenance, déchets) que de l'accès à un réseau commercial et de radiopharmacie.

À la fin des années 1990, l'IRE et CIS Bio avaient déjà envisagé de s'associer et le développement radiopharmaceutique actuel de l'IRE s'est fait en concertation avec CIS Bio intéressé par les productions ^{90}Y et ^{188}Re de l'IRE.

Dès lors, la reprise de CIS Bio par un concurrent ou le démantèlement de ses activités aurait pu avoir un impact très négatif pour l'IRE.

Aujourd'hui, CIS Bio recapitalisé par Schering AG avant la cession, termine une complète modernisation de ses installations de Saclay et disposera bientôt d'un outil de production unique, en conformité aux plus récentes exigences des autorités de sûreté nucléaire et de l'inspection pharmaceutique.

La venue du nouvel actionnaire accueillie favorablement par la direction et le personnel, suivie par des changements au niveau de la direction et de la stratégie et de la gestion de l'entreprise donnent dès à présent des résultats très prometteurs.

À côté de ces développements liés à la production de radioéléments au cœur de la mission de l'IRE et représentant 80 % de son chiffre d'affaires, l'IRE a continué l'exercice d'activités de support et d'utilité publique.

Au-delà du support administratif et financier requis par la gestion d'une industrie, la nature des activités de l'IRE nécessitait un support logistique adéquat. Un service achat qui répond aux exigences des marchés publics peu adaptées à une industrie de haute technologie, mais qui doit aussi tenir compte des exigences de validation des produits ce qui a conduit à créer un magasin et un atelier de préparation spécifique pour les produits entrant dans les fabrications radiopharmaceutiques. À côté de cela, l'IRE a aménagé un magasin central et un service de lavage et d'entretien des vêtements de travail, surbottes et masques.

La logistique associée aux transports de matières radioactives de courte durée de vie présente des exigences essentielles pour assurer tant la

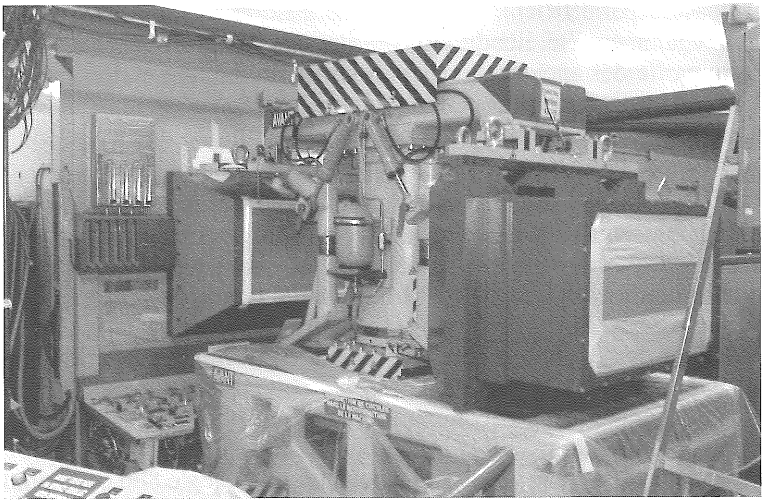
sûreté et le respect des réglementations que la régularité « *just in time* » des expéditions faites au travers du monde. Pour répondre aux spécificités de ce métier l'IRE recherche des partenaires industriels qui peuvent leur apporter toute leur expérience et fonde en 1988 la SA TRANSRAD avec la société Edmond Depaire au sein de laquelle on avait pu apprécier toute la compétence de François De Smedt, qui en deviendra le directeur général. TRANSRAD s'installe sur le site de Fleurus, site nucléaire où il peut bénéficier du support de l'IRE et où l'IRE met à sa disposition fin 2003, un bâtiment et un garage conçu pour présenter des conditions de sécurité optimales.

De son côté l'IRE gère un parc important de conteneurs qui pèsent de quelques dizaines de kilos à près de 6 t et pour lesquels l'obtention des agréments et des autorisations de transport sont critiques pour les activités de l'IRE, nécessitant la collaboration tant de TRANSRAD que des constructeurs de conteneurs au nombre desquels on compte en particulier NECSA-NTP. La gestion des conteneurs implique également leur décontamination systématique, leur maintenance et la vérification de leur étanchéité, activités pour lesquelles l'IRE a développé plusieurs installations dont l'extension est encore à l'étude.

Les services Maintenance/Ingénierie jouent un rôle essentiel de maintien de l'outil et des installations ainsi que pour l'amélioration des équipements existants et le développement de nouveaux projets. Si au-delà d'un programme de maintenance préventive, chaque production est suivie par un contrôle et une remise en état des équipements du procédé de production, une permanence est assurée pour d'éventuelles opérations de réparation en vue de minimiser toute période d'arrêt de travail. Dans cette perspective l'IRE possède un atelier d'usinage en zone froide et en zone chaude et un atelier d'entretien et réparation des télémanipulateurs.

Dans l'optique ALARA, mais aussi en vue d'une plus grande disponibilité des lignes de production, notre service d'ingénierie a conçu une machine unique au monde qui permet le remplacement de vitres au plomb défectueuses (leur poids est de 5 t) dans un délai de quelques heures, au lieu de devoir procéder à plusieurs mois de décontamination et ce grâce à un système de positionnement contrôlé à distance.

Figure 2 : Machine de remplacement des vitres au plomb



Afin d'assurer une plus grande sécurité pour les travailleurs en conditions de fonctionnement transitoires et de réduire la dose opérationnelle l'IRE procède systématiquement depuis 2004 à une ré-analyse du fonctionnement de ses ventilations, développant une instrumentation complète, adaptant l'automatisation et les points de fonctionnement tout en introduisant dans certains circuits un concept de filtre mixte HEPA/CA qu'il a développé en interne. Bien que toute innovation puisse rencontrer quelques difficultés de mise au point, le résultat est particulièrement probant sur la réduction de la dose aux travailleurs. L'IRE a également implanté un système de monitoring de la radioactivité présente dans les locaux, cellules et circuits de ventilation, système assurant non seulement une meilleure sécurité pour les travailleurs mais permettant également de distinguer l'origine des rejets à la cheminée, pouvant provenir des activités de l'IRE ou de MDS-NORDION.

En parallèle l'IRE a déployé le système de supervision industrielle PANORAMA, conçu par le CEA pour assurer avec la plus grande fiabilité, l'enregistrement, l'interprétation et l'usage de tout type de paramètre d'exploitation. Ce système a été implanté progressivement pour couvrir l'opération des nouvelles installations et être ensuite étendu à l'ensemble des paramètres opérationnels du site. Aujourd'hui, sur un seul écran, sur place ou à distance, on peut assurer la supervision et éventuellement interagir de façon contrôlée sur des paramètres garants de la sûreté tels que la sécurité des clôtures du site et des accès ainsi que le contrôle par vidéocaméras, la détection incendie, la gestion des alarmes et du système

d'information d'alerte/alarme, le monitoring radiologique interne au site ou extérieur (par exemple Hydrotéléray, le monitoring des rivières françaises assuré par l'IRE). Ce système de gestion des données d'exploitation a également été étendu aux ventilations des nouveaux laboratoires et à une partie des anciennes installations de production et de gestion des déchets, au système de production et de distribution d'air respirable, ainsi qu'à la gestion automatisée du stockage des colis de déchets et de leur caractérisation radioactive.

Les services maintenance/ingénierie se sont également consacrés ces dernières années à la conception de nouvelles installations et d'équipements spécifiques à certaines de nos activités. Au niveau du bâtiment de production radiochimique, l'IRE a étendu ses lignes de cellules chaudes et étudie le réaménagement des locaux rétrocédés par MDS-NORDION. Le bâtiment de gestion des déchets a fait l'objet d'une extension importante, intégrant deux cellules chaudes permettant d'envisager le démantèlement d'équipements encombrants contenant des sources radioactives de haute activité (par exemple les équipements de cobaltothérapie de 5 T) et intégrant un large carrousel prévu pour le stockage de 800 colis dont on peut suivre l'évolution de la radioactivité au quotidien. Ce bâtiment comporte également une zone de stockage pour les colis suspects et l'équipement IQ3 permettant d'éventuellement décider de leur libération.

Dans le cadre du développement des activités radiopharmaceutiques, un nouveau bâtiment a été construit pour accueillir les nouvelles chaînes de production et les bâtiments connexes ont été réaménagés pour y installer les activités de support logistique et le contrôle qualité. En plus de la construction des installations destinées à TRANSRAD au sein de l'IRE, des déménagements d'activités et la création de nouvelles installations telles que magasin, atelier d'entretien mécanique, laverie, laboratoire de traitement des déchets liquides, nouveaux locaux de stockage des matières nucléaires, de nouveaux locaux administratifs et un auditoire de 125 places ont été réalisés ces dix dernières années. On peut dire que si l'IRE avait suspendu tout projet de gros travaux entre 1985 et 1995, il rattrape aujourd'hui le temps perdu.

Le bureau d'ingénierie a également contribué aux développements de nombreux équipements pour le compte de différents services, tels que la conception d'une unité mobile de traitement automatisé des déchets liquides, la conception des stations de monitoring radiologique, la conception du générateur $^{188}W/^{188}Re$, etc.

Pour ces réalisations d'ingénierie, l'IRE a modernisé ses outils de conception, faisant l'acquisition de logiciels de calcul des sources radioactives et de simulation Monte Carlo pour les calculs de criticité et de blindage, ainsi que du simulateur de dose opérationnelle développé par le SCK•CEN. Il a également adopté un logiciel permettant d'accroître la

vitesse de réalisation de plans et de fiabiliser les conceptions par des simulations et représentations à 3 dimensions. Enfin l'IRE a fait l'acquisition d'un simulateur permettant la modélisation mathématique des installations, dont l'utilisation combinée avec l'information obtenue par PANORAMA ouvre des perspectives nouvelles en matière d'optimisation de conception ou d'intervention en conditions d'urgence.

Dans le cadre du support aux activités de notre industrie, le service décontamination et gestion des déchets joue un rôle essentiel au quotidien en assurant les conditions de propreté requises pour les productions et les interventions des services de maintenance. En particulier il assure le contrôle et la maintenance des différents types de conteneur de transport utilisés sur le site, c'est-à-dire entre 1 000 et 2 000 interventions par an pour remettre chaque conteneur en parfait état après chaque usage. Son intervention est également critique si un incident de contamination d'équipement ou de locaux devait arriver.

Le service prend en charge les différents types de déchets produits sur le site. Pour les déchets classiques mais suspects, solides ou liquides, après une vérification très sensible du niveau de radioactivité, il peut appliquer une procédure de libération avec l'accord des autorités. Pour les déchets solides de haute activité, le service dispose d'installations permettant une gestion dynamique tirant profit de la décroissance de déchets qui comportent souvent des isotopes de courte durée de vie. Pour les déchets liquides, l'IRE a développé des installations permettant d'éliminer sélectivement certains isotopes tels que le ^{90}Sr, permettant ainsi de bénéficier également d'une réduction de la dangerosité et du coût final de prise en charge des déchets par Belgoprocess.

Enfin, accessoirement, l'IRE qui avait au départ une expertise en matière de fabrication de sources scellées, effectue aujourd'hui pour le compte de l'ONDRAF, le démantèlement des sources scellées usées, ainsi chaque année il retire et met aux déchets la très petite quantité de radioactivité contenue dans 10 à 20 000 détecteurs de fumée et dans plusieurs centaines de sources industrielles ou médicales.

L'IRE a également été amené à apporter son support à l'ONDRAF, dans l'étude du projet de stockage de déchets de type A, de faible activité et courte durée de vie, envisagé sur le site de Fleurus.

Après l'élaboration d'un concept original particulièrement bien adapté au site, prévoyant un dépôt progressif, contrôlable et réversible dans trois silos cylindriques, enterrés et présentant une double enceinte de protection ainsi qu'un système de drainage, projet ayant reçu un avis positif des experts, les autorités communales décident de créer en 2002 le Partenariat local Fleurus Farciennes (PALOFF). L'IRE a soutenu ce projet qui pouvait s'intégrer à ses activités courantes et offrait une garantie de pé-

rennité du site à long terme. Il a contribué à l'étude de l'impact du projet et a participé activement aux travaux de PALOFF concernés par les aspects techniques et socio-économiques. Pour des raisons plus politiques que techniques, à la dernière minute, la Ville de Fleurus a refusé de présenter le projet.

Il nous reste maintenant à considérer l'aspect le plus important pour une installation nucléaire : assurer la sécurité et la protection de l'environnement.

Les conditions de sécurité pour les travailleurs et pour les populations ont toujours été au centre d'une préoccupation constante à l'IRE et nous continuons à investir dans la sécurité, et en particulier en radioprotection avec des résultats très positifs en particulier sur la réduction des doses aux travailleurs. Nous avons développé nos capacités d'analyse de sûreté et nous avons amélioré l'efficacité de nos systèmes de ventilation, de protection incendie et des protections biologiques. Nous avons renforcé notre service de sécurité/radioprotection et assuré son support par un service de radioprotection et de métrologie de la radioactivité dans l'environnement.

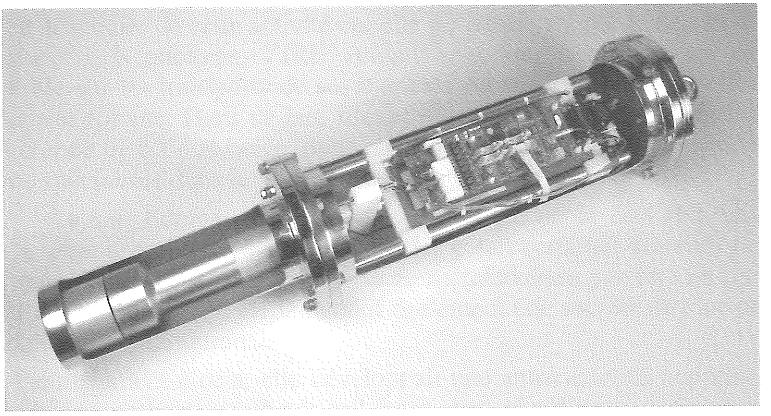
À côté de son rôle de surveillance quotidienne des opérations et des installations, le service de sécurité a participé à toutes les études de développement de nouveaux procédés de production et de nouvelles installations, en effectuant en particulier l'analyse de sûreté et en présentant son rapport de sûreté aux autorités. Ce fut ces dix dernières années un travail considérable dans une industrie en développement rapide et en constante amélioration de ses conditions d'exploitation. Aujourd'hui l'IRE consolide un Rapport de sûreté unique et a entamé les études de première révision décennale. En s'installant à Fleurus, l'IRE s'était donné comme mission de vérifier que son fonctionnement n'affectait pas l'environnement et ce, avec les moyens de détection permanente les plus sensibles. De ce concept est née l'idée reprise par la Région wallonne de demander que, tout autour des installations nucléaires de Fleurus, de Tihange, mais aussi de Chooz ainsi qu'en différents points du territoire, soit installé un réseau de mesure automatique de la radioactivité de l'air. Créé en première mondiale par l'IRE et face au scepticisme de la communauté scientifique, ce réseau s'avérera être très fiable et très sensible à toute variation de la radioactivité dans l'environnement. Il donnera à notre région en 1986, une image précise du passage du nuage radioactif provenant de Tchernobyl. Ce réseau sera complété par un système de mesure de la radioactivité des rivières, mettant en fait plus en évidence les activités des agriculteurs et des hôpitaux que celles des centrales nucléaires. Cette dernière réalisation a impressionné nos voisins français, qui nous ont demandé d'équiper leurs rivières du système Hydrotéléray dont nous assurons toujours le suivi aujourd'hui. Ces réalisations étaient les précurseurs du réseau TELERAD que l'État a souhaité installer sur l'ensemble

du territoire et pour lequel on nous a demandé de collaborer à la réalisation du cahier des charges.

Aujourd'hui l'IRE reste à l'avant-garde du développement d'équipement de télésurveillance de la radioactivité de l'environnement. Après un effort de recherche de plusieurs années, commandité au départ par l'Armée française pour la surveillance de l'Atoll de Mururoa, l'IRE a développé une sonde intelligente destinée à la mesure en continu de la radioactivité des océans, estuaires ou autres eaux de surface. Sa capacité de détecter par m³ d'eau 5 Becquerels de ^{137}Cs ou d'un autre isotope, dans un bruit de fond de 12 000 Bq a séduit AQUANORD qui en a équipé ses installations de pisciculture à la Centrale de Gravelines dès 2001.

Ensuite, ce système a été adopté pour les nouvelles stations Hydrotéléray commandées par l'IRSN, installé en Hollande sur la Meuse et le Rhin, au Maroc dans le détroit de Gibraltar et son installation sur l'Escaut en face de Doel est à l'étude. Le système a également été utilisé pour faire une étude de l'évolution de la radioactivité trouvée dans les stations d'épuration d'eau ce qui à l'avenir pourrait s'avérer important. Enfin, l'IRE a adapté la sonde pour pouvoir l'utiliser dans le monitoring en temps réel de ses circuits de ventilations et tout récemment des rejets gazeux.

Figure 3 : Sonde de mesure de la radioactivité



L'IRE se préoccupe également de la sécurité à l'extérieur de ses installations. Avec le support de ses laboratoires de métrologie basse activité, il fournit ses services à l'Agence fédérale de contrôle nucléaire pour des missions de surveillance radiologique du territoire, mais il fournit aussi ses services à l'industrie et aux services publics pour des missions d'intervention en cas d'urgence, par exemple en cas de découverte d'une source radioactive égarée.

L'IRE a organisé son propre plan d'urgence pour le site, et depuis 1991, il a été convié à participer à la mise en place des plans d'urgence extérieurs tant au niveau de la cellule de décision que de la cellule de mesure qui intervient sur le terrain.

L'expertise accumulée par l'IRE tant au niveau de la gestion des déchets et en particulier des sources scellées usées que de leur caractérisation et de la surveillance de l'environnement lui ont permis d'obtenir ces dix dernières années auprès de la Commission européenne, de l'AIEA, voire de la Région wallonne, parfois en association avec d'autres sociétés belges ou étrangères, de nombreux contrats d'assistance et d'étude pour la Russie, la Roumanie, la Bulgarie, la Croatie, la Slovénie et le Maroc.

Au-delà de sa mission industrielle de production et de recherche et développement, la mission d'utilité publique de l'IRE conduit également à partager son expertise dans les différents secteurs décrits ci-devant, au travers de stages dans ses laboratoires, de formations données en interne ou dans les grandes écoles, d'organisation de séminaires ou de conférences scientifiques et enfin par une information ouverte au Public sur les réalités et les promesses de notre métier.

TRANSRAD, l'histoire d'un succès

François DE SMEDT

Directeur général

S.a. TRANSRAD n.v. est une société anonyme de droit privé créée le 18 janvier 1988.

Les sociétés fondatrices sont d'une part l'Institut national des radioéléments (IRE) à Fleurus et d'autre part la s.a. Edmond Depaire, filiale routière de la SNCB (Société nationale des chemins de fer belge).

Ces 2 sociétés avaient dans la création de TRANSRAD un but commun :

- L'IRE, qui disposait de son propre service de transport avait décidé de se distancier de cette activité car elle ne faisait pas partie de son « *core business* ». Néanmoins, l'IRE voulait continuer à exercer un certain contrôle sur les transports de ses matières ou sur les transports effectués pour son compte. Dans ce but, il était à la recherche d'un partenaire, de préférence lié à l'état belge, pour créer une société de transport indépendante spécialisée dans le transport de matières radioactives.
- La s.a. Edmond Depaire, filiale routière de la SNCB à environ 95 %, était une société de droit privé qui gérait certaines activités routières complémentaires aux transports de marchandises par fer. En plus de cette activité, la s.a. E. Depaire était également une société de transport et d'expédition internationale.

Parallèlement à cela, elle développait une autre activité importante, à savoir les transports combinés rail/route, ceci afin d'essayer d'augmenter la quote-part de la SNCB dans le flux de transport de marchandises.

En 1972, la s.a. E. Depaire est contactée par l'ancienne société MMN (Métallurgie mécanique nucléaire), filiale de FN et située à Dessel, pour le transport d'éléments de combustible UO^2 frais vers les centrales belges de Doel et de Tihange.

En 1974 la société MMN est reprise par un groupe français, Framatome, et la société FBFC est fondée (Franco-belge de fabrication de combustible).

Le choix de MMN/FBFC s'était porté sur la s.a. Edmond Depaire car cette dernière était une filiale de la SNCB et était donc un lien direct avec l'état belge. Ces transports se faisaient sous couvert des autorisations de transport de MMN/FBFC.

En 1982, en collaboration avec la SNCB, la s.a. Edmond Depaire organise le chargement et le transport d'environ 5 000 t de déchets conditionnés pour le rejet en mer.

Des préparatifs pour une opération similaire débutent en 1983 mais sont ensuite stoppés en raison de la ratification par la Belgique de la Convention de Londres interdisant le rejet en mer de déchets radioactifs.

La s.a. E. Depaire devient alors de plus en plus active dans le secteur du transport de matières radioactives, notamment dans la distribution de radioisotopes à des fins médicales.

À l'époque, l'Autorité compétente a fait comprendre qu'un développement des activités de transport de matières radioactives était exclu vu le manque de spécialisation au sein de la s.a. E. Depaire.

De ce fait, la s.a. E. Depaire était, tout comme l'IRE et pratiquement au même moment, à la recherche d'un partenaire dans le secteur du nucléaire pour créer une filiale de transport spécialisée dans les matières radioactives.

Le 30 septembre 1987, une convention est signée entre l'IRE et la s.a. Edmond Depaire. Cette convention prévoit pour la s.a. E. Depaire des activités de distribution des radioisotopes produits par l'IRE et contient également un engagement des 2 partenaires à créer une société de transport spécialisée dans les matières radioactives.

La s.a. TRANSRAD n.v. est créée le 18 janvier 1988 avec un capital équivalent à environ 75 000 euros dont l'IRE détient à ce moment un tiers et Depaire deux tiers.

Sous la pression de la clientèle pour faire face à certaines situations de monopole et afin de pouvoir démarrer un développement au niveau international, le capital est augmenté à l'équivalent de 250 000 euros et un troisième partenaire rejoint la société : NCT, société privée de droit français spécialisée dans le transport de matières radioactives.

La répartition du capital est alors la suivante : IRE 30 %, Depaire 60 % et NCT 10 %.

En 1992, suite à une décision au sein de la SNCB de vendre quelques filiales, Edmond Depaire vend sa participation dans la s.a. TRANSRAD.

Grâce au droit de préemption prévu dans les statuts, les actions détenues par Depaire sont reprises par les 2 autres partenaires pour arriver à une répartition du capital de 49 % pour l'IRE et 51 % pour NCT.

Cette répartition est encore la même à ce jour. En 2004, le capital de la société est doublé par incorporation de bénéfices cumulés pour arriver à un montant de 500 000 euros.

En 1993, TRANSRAD organise un transport d'environ 500 t d'UF6 appauvri au départ de Belgonucleaire vers la Russie pour le compte de Synatom.

Cette opération, qui s'est très bien déroulée, a été le point de départ pour permettre à TRANSRAD de devenir exploitant nucléaire dans le sens de la Convention de Paris sur la responsabilité civile nucléaire.

L'arrêté royal du 30 juin 1996 reconnaît TRANSRAD comme transporteur considéré comme exploitant d'une installation nucléaire.

Aujourd'hui, TRANSRAD est devenu un maillon important dans la chaîne nucléaire avec un chiffre d'affaires qui ne cesse d'augmenter d'année en année.

Tous les modes de transport sont utilisés à savoir : la route, le fer, l'air et la mer.

Les activités principales sont réparties dans les domaines suivants :

- Cycle du combustible, réacteurs de puissance ;
- Cycle du combustible, réacteurs de recherche ;
- Transport de combustible irradié, réacteurs de recherche ;
- Transport de HEU, frais et irradié, pour la production du ^{99}Mo ;
- Transport de sources radioactives de haute activité ;
- Transport de matériel de contrôle ;
- Transport de radioisotopes à usage médical ;
- Transport de déchets radioactifs ;
- Escortes en Belgique et en Hollande de transports de catégorie I, II et III ;
- Assurances responsabilité civile nucléaire ;
- Assistance documentaire (validations, licences, autorisations, etc.) ;
- Études de faisabilité.

Pratiquement 20 ans après sa création, la s.a. TRANSRAD est devenue un joueur incontournable sur la scène internationale de la logistique nucléaire, grâce à son savoir-faire et la confiance dont elle bénéficie de la part des autorités compétentes, de sa clientèle et de ses actionnaires.

Figure 1 : Transport de combustible UO_2 frais pour réacteurs de puissance



Figure 2 : Transport de combustible HEU irradié de réacteurs de recherche



La gestion des déchets radioactifs

Jean-Paul MINON et Brigitte CORNÉLIS

Directeur général de l'Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies ONDRAF/NIRAS

Rédactrice scientifique indépendante

En Belgique, la gestion des déchets radioactifs est du ressort de l'Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies (ONDRAF), créé à cet effet par la loi du 8 août 1980. Les compétences et missions de l'ONDRAF, qui sont définies par l'arrêté royal du 30 mars 1981, ont ensuite été complétées à deux reprises, en 1991 et en 1997[1]. Placé sous la tutelle du Gouvernement fédéral par le biais du ministre qui a l'énergie dans ses attributions, l'ONDRAF dépend également des autorités de sûreté compétentes, à savoir depuis 2001 l'Agence fédérale de contrôle nucléaire (AFCN), pour tout ce qui concerne les aspects de contrôles et d'autorisations.

Les compétences et missions de l'ONDRAF peuvent se résumer comme suit.

- La *gestion de tous les déchets radioactifs* présents sur le territoire belge quelle qu'en soit l'origine, qui comprend
  - leur transport, leur traitement et leur conditionnement ;
  - l'entreposage des déchets conditionnés et leur évacuation, laquelle peut notamment prendre la forme d'une mise en dépôt final.
- La *gestion des quantités excédentaires de matières fissiles enrichies, de matières plutonifères et de combustible neuf ou usé*, c'est-à-dire la gestion des quantités de ces matières et combustibles pour lesquelles

---

1 La loi du 11 janvier 1991 a remplacé l'article 179 § 2 de la loi de 1980, tandis que l'arrêté royal du 16 octobre 1991 modifiait et complétait celui de mars 1981. La nouvelle loi a elle-même été amendée et complétée par la loi-programme du 12 décembre 1997, qui confie à l'ONDRAF une mission d'inventaire des passifs nucléaires, tandis que l'arrêté royal du 30 mars 1981 a été modifié par les arrêtés royaux du 4 avril 2003 et du 1er mai 2006.

aucune utilisation ou transformation ultérieure n'est prévue par le producteur ou l'exploitant. Celle-ci comprend

- leur transport ;
- leur entreposage en dehors des installations des producteurs ou exploitants.

- Le *déclassement des installations nucléaires désaffectées*, c'est-à-dire l'ensemble des opérations administratives et techniques qui permettent de retirer une installation de la liste des installations classées. Celui-ci comprend :
  - la collecte et l'évaluation des informations nécessaires à l'établissement des programmes de gestion relatifs aux déchets qui résulteront du déclassement ;
  - l'accord sur les programmes de déclassement des installations contaminées ;
  - l'exécution des programmes de déclassement, à la demande des exploitants ou en cas de défaillance de ceux-ci.
- L'*inventaire des passifs nucléaires*[2], c'est-à-dire l'inventaire des obligations financières qui résulteront du déclassement et de l'assainissement de toutes les installations nucléaires et de tous les sites contenant des substances radioactives et qui ne sont pas, ou pas intégralement, couvertes par des provisions existantes ou par des provisions dont la constitution en cours d'exploitation est prévue. L'inventaire des passifs nucléaires, qui doit être mis à jour tous les cinq ans, implique
  - l'établissement d'un répertoire de la localisation et de l'état de toutes les installations nucléaires et de tous les sites contenant des substances radioactives ;
  - l'estimation de leur coût de déclassement et d'assainissement ;
  - l'évaluation de l'existence et de la suffisance des provisions pour le financement de ces opérations.

L'ONDRAF exerce également d'autres activités, dans le cadre de dossiers particuliers, comme celui de l'assainissement de certains héritages nucléaires du passé, les « passifs nucléaires » des sites 1 et 2 de Belgoprocess (sites BP1 et BP2), du Centre d'étude de l'énergie nucléaire (SCK•CEN) et de l'Institut national des radioéléments (IRE).

L'ONDRAF peut effectuer ses missions par ses propres moyens, les sous-traiter ou en confier l'exécution à des tiers, sous sa responsabilité. En pratique, il sous-traite ou confie à des tiers les activités industrielles,

---

[2] La dénomination « inventaire des passifs nucléaires » peut porter à confusion, en ce sens que cette mission a précisément pour objectif de prévenir l'apparition de nouveaux passifs nucléaires.

les études et les activités de RD&D (recherche, développement et démonstration), en assure la coordination générale et assure l'intégration des connaissances. Le traitement et le conditionnement des déchets radioactifs produits en Belgique qui ne sont pas traités par les producteurs sur leurs sites respectifs sont principalement sous-traités à Belgoprocess, l'entreprise filiale de l'ONDRAF, de même que l'entreposage des déchets radioactifs conditionnés. Les études et la recherche sont sous-traitées à des bureaux d'études tels que Belgatom et à des centres de recherche tels que le SCK•CEN, en Belgique et à l'étranger. Les projets de démonstration à grande échelle dans l'Argile de Boom et les expériences *in situ* sont confiés à EURIDICE, le groupement d'intérêt économique (GIE) créé en 1995 sous le nom de GIE PRACLAY par l'ONDRAF et le SCK•CEN.

Ce chapitre fait un rapide survol de la période 1990-2005 en matière de gestion des déchets radioactifs. Il est organisé selon les domaines d'activités de l'ONDRAF plutôt que selon un ordre strictement chronologique. Après une introduction à la *classification des déchets radioactifs* établie par l'ONDRAF et un aperçu de l'*inventaire* des déchets radioactifs il établit en particulier ce qui suit :

- La *gestion à court terme* des déchets radioactifs s'effectue aujourd'hui en routine.
- La *gestion à long terme* des déchets radioactifs s'effectue en routine pour ce qui concerne leur entreposage.
- Le programme de travail en vue de l'*évacuation des déchets de faible et moyenne activité et de courte durée de vie (déchets de catégorie A)* est passé en phase de projet avec la décision du Gouvernement fédéral du 23 juin 2006 d'opter, pour ces déchets, pour la mise en dépôt final en surface sur le territoire de la commune de Dessel.
- Le programme de travail en vue de l'*évacuation des déchets de haute activité et/ou de longue durée de vie (déchets des catégories B&C)* est au stade de la RD&D méthodologique et se focalise sur l'étude de la solution de référence, à savoir la mise en dépôt géologique dans l'Argile de Boom.
- L'importance d'une réelle *prise en compte des aspects sociétaux* dans les programmes de dépôt s'est imposée avec force vers le milieu des années 1990 dans le cadre du programme catégorie A. La participation sociétale fait depuis lors partie intégrante du programme catégorie A et l'instauration d'un dialogue sociétal est en cours de préparation pour le programme B&C : le facteur sociétal jouera très certainement un rôle déterminant dans l'évolution des deux programmes.
- L'élaboration d'un *système d'acceptation* des déchets règle désormais les modalités de la prise en charge des déchets des producteurs par l'ONDRAF.

- Les activités dans le domaine de la *gestion des quantités excédentaires de matières nucléaires* se limitent actuellement à l'établissement de règles générales en vue de l'établissement de critères d'acceptation pour l'entreposage de ces matières.
- L'*assainissement des passifs nucléaires existants* a considérablement progressé, tant au niveau passifs déchets qu'au niveau passifs démantèlement ; le démantèlement en cours du bâtiment principal de l'ancienne usine pilote de retraitement Eurochemic à Dessel et celui du réacteur de recherche BR3 du SCK•CEN à Mol sont actuellement les deux plus gros chantiers de démantèlement en Belgique.
- Le premier exercice d'*inventaire des passifs nucléaires* a fourni au Gouvernement fédéral un premier outil en vue de l'élaboration et de la mise en œuvre d'une politique de prévention de l'apparition de nouveaux passifs nucléaires.

Ce chapitre s'achève par quelques mots sur l'implication de l'ONDRAF dans le *dossier Umicore* et sur le *financement* des activités de l'ONDRAF, avec en particulier l'avancée importante que représente la mise en œuvre du fonds à long terme, ainsi que par quelques considérations tournées vers l'avenir.

I. Classification et origines des déchets radioactifs

La diversité des caractéristiques radiologiques des déchets radioactifs a nécessité la mise au point d'un système de classification adéquat pour leur gestion. Ainsi, pour la mise en dépôt final des déchets radioactifs conditionnés, l'ONDRAF a adopté en 1997 une classification pyramidale à quatre niveaux – les groupes (2), les catégories (3), les classes (20) et les flux (plus d'une centaine) –, qui est compatible avec les grandes classifications internationales et peut être adaptée si nécessaire. L'établissement de cette classification constitue un apport important à la gestion technique, administrative et financière des déchets.

Des quatre niveaux de la classification, celui des catégories de déchets est le plus communément utilisé.

- Les déchets de catégorie A sont les déchets dont les caractéristiques radiologiques ont des valeurs suffisamment faibles pour permettre leur mise en dépôt en surface. En d'autres termes, ce sont des déchets dont le niveau d'activité atteindra par décroissance une valeur comparable à celle de la radioactivité naturelle dans un laps de temps compatible avec les possibilités de contrôle du dépôt après sa fermeture, qui sont de l'ordre de 200 à 300 ans. Les déchets de catégorie A sont les déchets de faible et moyenne activité et de courte durée de vie, aussi parfois appelés « déchets de faible activité et de courte durée de vie ».

Les déchets de catégorie A ont des origines très variées et sont donc de natures très diverses. Ils sont issus de la production électronucléaire par les centrales de Doel et de Tihange, de la production et de l'utilisation de radionucléides à des fins médicales et industrielles, d'activités de recherche et du démantèlement des installations nucléaires désaffectées. Ce sont par exemple des déchets solides et des effluents liquides de laboratoire, des tenues de protection, des résidus du traitement des eaux usées dans les centrales nucléaires, des filtres, des pièces d'équipements mis hors service ou encore certains déchets radioactifs de démantèlement, comme du béton et des métaux.

- Les déchets de catégorie B sont les déchets de faible et moyenne activité contaminés par des radionucléides de longue durée de vie en quantités telles qu'ils ne peuvent être mis en dépôt en surface, mais qui ne dégagent pas suffisamment de chaleur pour être rangés dans la catégorie C. Les déchets de catégorie B proviennent principalement de la fabrication des combustibles nucléaires et du retraitement des combustibles usés, mais près d'un quart d'entre eux seront des déchets de démantèlement.
- Les déchets de catégorie C sont les déchets de haute activité, contenant de grandes quantités de radionucléides de longue durée de vie. La plupart de ces déchets émettent initialement une grande quantité de chaleur, ce qui, en tout cas dans l'hypothèse de leur mise en dépôt en profondeur dans l'Argile, obligerait à les laisser refroidir au préalable durant au moins 60 ans. Ce sont notamment les produits de fission du retraitement des combustibles nucléaires usés, les combustibles usés eux-mêmes (si le retraitement est définitivement abandonné par la Belgique) et les éventuelles matières fissiles excédentaires. Les autres déchets de catégorie C émettent moins de chaleur et sont essentiellement des matériaux constitutifs des assemblages de combustible et des parties internes des réacteurs.

Un groupe particulier de déchets n'est pas concerné par la classification générale des déchets radioactifs : ce sont les *déchets contaminés au radium*, essentiellement liés aux activités d'extraction de radium, entre 1922 et 1977, de l'ancienne usine d'Olen de l'Union minière, devenue Umicore en 2001. Ces déchets regroupent des déchets qui font l'objet d'un entreposage autorisé sur le site d'Umicore à Olen et ceux qui seront issus de l'assainissement de terrains contaminés situés à l'intérieur de l'enceinte du site ainsi que de l'assainissement d'une décharge dite « D1 » et de divers terrains contaminés situés à l'extérieur de l'enceinte du site. Les déchets contaminés au radium font l'objet d'un dossier séparé, dit « dossier Umicore ».

II. Gestion des déchets radioactifs

Le système global de gestion des déchets radioactifs de l'ONDRAF comprend les activités de *gestion à court terme* et les activités de *gestion à long terme*. Deux aspects complémentaires importants, tant pour le court terme que pour le long terme, sont, d'une part, l'établissement et le maintien à jour d'un inventaire de ces déchets et, d'autre part, la vérification qu'ils possèdent des caractéristiques compatibles avec les exigences imposées par les différentes étapes de leur gestion.

A. Inventaire des déchets radioactifs

Une gestion efficiente des déchets radioactifs nécessite un inventaire quantitatif et qualitatif des déchets existants et futurs.

1. Déchets des catégories A, B et C

Depuis le début des années 1990, l'ONDRAF met à jour environ tous les cinq ans son inventaire des déchets radioactifs. Pour les déchets des catégories A, B et C, cet inventaire se base sur la connaissance des stocks de déchets entreposés à Belgoprocess, les prévisions des producteurs en ce qui concerne leurs déchets d'exploitation et les prévisions de production de déchets de démantèlement.

Selon les estimations les plus récentes de l'ONDRAF, à savoir celles réalisées en 2003-2004 sur la base des données de l'inventaire de 2003, les volumes de déchets conditionnés des catégories A, B et C à gérer d'ici 2070, autrement dit d'ici la fin des activités de démantèlement de toutes les installations nucléaires existantes et prévues, sont les suivants (Figure 1 et Table 1) :

- 70 500 m^3 de déchets de catégorie A ;
- 8 700 m^3 de déchets de catégorie B ;
- 2 100 ou 4 700 m^3 de déchets de catégorie C, selon que le moratoire actuel sur le retraitement des combustibles usés est levé ou qu'il est poursuivi.

Cette estimation prend en compte la loi du 31 janvier 2003 sur la sortie progressive de l'énergie nucléaire : elle suppose que les sept réacteurs nucléaires de puissance actuels seront exploités durant 40 ans chacun.

Figure 1 : Prévision de production de déchets radioactifs conditionnés des catégories A, B et C d'ici 2070, réalisée en 2003-2004 sur la base de l'inventaire de 2003

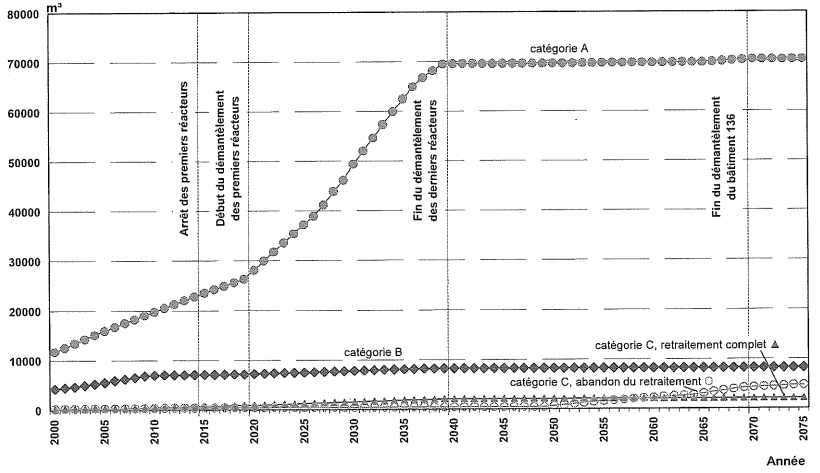


Table 1 : Volumes de déchets conditionnés des catégories A, B et C entreposés à Belgoprocess fin 2005 et prévision de production d'ici 2070, réalisée en 2003-2004 sur la base de l'inventaire de 2003

Catégorie de déchets	Volume entreposé [m³] (fin 2005)	Estimations actuelles du volume total [m³] (d'ici 2070)	
A		Centrales nucléaires de puissance	
		Déchets d'exploitation	13 800
		Déchets de démantèlement	35 300
		Autres	
		Déchets d'exploitation	4 900
		Déchets de démantèlement	16 500
	13 495	Total	70 500
		si reprise du retraitement (pour tous les combustibles)	si abandon du retraitement
B	3 966	8 700	8 700
C	253	2 100	4 700

D'après l'inventaire, le volume total de déchets de catégorie A représentera d'ici 2070 environ 85 % du volume total des déchets conditionnés des catégories A, B et C. La moitié de ces déchets de catégorie A sont des déchets issus du démantèlement des réacteurs nucléaires de puissance et représentent donc un volume qui ne dépend pas de leur durée d'exploitation (Table 1).

Les déchets conditionnés existants sont actuellement entreposés à Belgoprocess, dans l'attente d'une solution adéquate pour le long terme (Table 1).

2. Déchets contaminés au radium

L'inventaire des déchets contaminés au radium d'Umicore a été estimé comme suit :

- environ 45 800 m^3 de déchets entreposés depuis le milieu des années 1980 dans une installation autorisée de classe II construite sur le site d'Umicore à Olen ;
- quelques dizaines de milliers de mètres cubes de déchets qui seront issus des travaux d'assainissement à réaliser à l'intérieur et à l'extérieur de l'enceinte du site d'Umicore à Olen.

B. Gestion à court terme

La gestion à court terme couvre l'ensemble des activités de gestion courante qui précèdent l'entreposage des déchets conditionnés en attendant la mise en œuvre d'une solution définitive pour leur gestion. Elle comprend quatre types d'activités : la gestion à la source des déchets, leur transport, leur traitement et leur conditionnement. Ces activités ont été développées et structurées : ce sont aujourd'hui des opérations industrielles effectuées en routine, pour la plupart par le personnel spécialisé de Belgoprocess.

1. Gestion à la source

Grâce aux efforts des producteurs de déchets radioactifs pour limiter autant que possible la production de déchets à la source, la quantité de déchets radioactifs de production courante diminue régulièrement d'année en année. Ainsi, alors qu'en 1988, l'ONDRAF enlevait 330 t de déchets solides combustibles de producteurs tiers (c'est-à-dire hors Belgoprocess et hors assainissement des sites BP1 et BP2), la quantité enlevée annuellement fluctue aux alentours des 100 t depuis 1999. Quant à la quantité d'effluents contaminés en provenance de producteurs tiers, qui était de 165 000 m^3 en 1988, elle fluctue autour de 5 000 m^3 depuis 1994. L'effort de prévention se marque aussi dans les activités de Belgoprocess, y compris dans les opérations de démantèlement, qui bénéficient de l'amélioration constante des techniques de décontamination.

2. Transports

Chargé depuis 1986 de l'organisation concrète de tous les transports de déchets radioactifs produits en Belgique, l'ONDRAF a rationalisé ces transports et a instauré un système de centralisation de toutes les informa-

tions relatives aux déchets collectés. Depuis 1996, c'est toutefois Belgoprocess qui planifie et supervise l'enlèvement des déchets chez les producteurs, afin qu'ils soient acheminés vers ses installations centralisées de traitement, de conditionnement et d'entreposage. L'ONDRAF attribue par marchés publics les transports de déchets proprement dits à des sociétés spécialisées. Actuellement, ces marchés ont été attribués aux firmes Transnubel et Transrad.

3. Traitement et conditionnement

Les opérations de traitement et de conditionnement visent à transformer les déchets radioactifs bruts en un produit final aussi compact que possible, chimiquement stable, et dans la masse duquel sont piégés les radionucléides. Ce produit est lui-même confiné dans un emballage métallique et le colis de déchets conditionnés ainsi obtenu est alors entreposé dans l'attente d'une solution de gestion qui soit définitive. Selon les perspectives actuelles, une bonne partie des futurs déchets de démantèlement sera conditionnée directement dans des caissons en béton.

Les opérations de traitement et de conditionnement sont définies en fonction de la nature des déchets, des installations disponibles, des critères d'acceptation applicables et de la destination finale de référence des déchets au moment du traitement et du conditionnement.

Grâce à l'amélioration des techniques existantes, au développement et à la mise en œuvre de nouveaux procédés au fur et à mesure des besoins et aux investissements réalisés par l'ONDRAF, Belgoprocess peut aujourd'hui traiter et conditionner en routine la production courante de déchets radioactifs, qu'ils soient solides ou liquides, et de faible, moyenne ou haute activité[3]. Belgoprocess a également conditionné une partie des stocks de déchets présents sur le site BP1 (site de l'ancienne usine pilote de retraitement Eurochemic à Dessel) et le site BP2 (site de l'ancien département *Waste* du SCK•CEN à Mol), qui étaient essentiellement des déchets des passifs nucléaires.

Les principaux investissements en matière d'infrastructures ont été les suivants :

- adaptation des installations de traitement et de bitumage Eurobitum (site BP1) ainsi que Mummie et BRE (site BP2) ;
- adaptation de l'installation PAMELA (site BP1), initialement conçue pour la vitrification des déchets liquides de haute activité provenant

[3] Les déchets issus du retraitement par COGEMA de combustibles nucléaires usés déchargés des centrales belges ont été traités et conditionnés sur place par COGEMA. Compte tenu du moratoire sur le retraitement en vigueur depuis 1993, le retraitement de combustibles par COGEMA s'est limité aux combustibles visés par les quatre contrats passés en 1976 et 1978 avec Synatom.

d'Eurochemic, en vue du traitement et du conditionnement, à partir de 2007, de certains déchets des passifs nucléaires et des déchets similaires de production courante : déchets non radifères de moyenne activité et déchets spéciaux historiques du HRA/Solarium ainsi que déchets contaminés en émetteurs alpha (plutonium, américium, etc.), aussi appelés déchets A3X. Avec l'adaptation de l'installation PAMELA et la construction du bâtiment d'entreposage 155, la Belgique dispose d'une filière de gestion complète des déchets contaminés en émetteurs alpha. Ces déchets sont issus de la fabrication du combustible MOX et du démantèlement de l'ancienne usine pilote de retraitement Eurochemic. Le démantèlement de l'usine de fabrication de combustible MOX de Belgonucleaire donnera également lieu à des déchets de ce type ;

- adaptation de locaux du bâtiment 110 d'Eurochemic (site BP1) en vue du tri des déchets A3X, dont certains appartiennent aux passifs nucléaires ;
- construction de trois nouvelles installations :
  - l'installation CILVA (site BP1), mise en service en 1994-1995, est l'infrastructure de traitement et de conditionnement des déchets solides et liquides de faible activité qui remplace les installations obsolètes de l'ancien département « Waste » du SCK•CEN. Elle comprend une unité de supercompaction, une unité d'incinération et une unité de cimentation ;
  - l'installation de pyrolyse (site BP2), mise en service en 1999, permet la dégradation thermique de liquides organiques contaminés alpha provenant d'Eurochemic, les résidus solides du traitement étant ensuite compactés et cimentés dans l'installation PAMELA adaptée ;
  - le bâtiment 280 (site BP2), mis en service en 2003, permet le traitement et le conditionnement de certains déchets des passifs nucléaires (déchets radifères et déchets non radifères de moyenne activité du HRA/Solarium) et des déchets similaires de production courante.

C. Gestion à long terme

La gestion à long terme comprend l'entreposage des colis de déchets conditionnés dans des bâtiments spécialement conçus à cet effet sur le site BP1et la mise en œuvre ultérieure d'une solution adéquate pour le long terme.

1. Entreposage

Aux quatre bâtiments d'entreposage du site BP1 mis en service dans les années 1970 (bâtiment 127 pour les déchets de moyenne activité) et quatre-vingt (bâtiments 150 et 151 pour les déchets de faible activité et bâtiment 129 pour les déchets de haute activité) se sont ajoutés trois nouveaux bâtiments durant la période 1990-2005, tous sur le site BP1.

- Le bâtiment 136, mis en service en 1995, est destiné à l'entreposage des déchets de moyenne et haute activité provenant du retraitement par COGEMA (devenu AREVA NC le 1er mars 2006) des combustibles usés déchargés des centrales nucléaires belges ainsi que du retraitement à UKAEA Dounreay (Ecosse) de combustibles usés du réacteur de recherche BR2 du SCK•CEN.
- Le bâtiment 156, mis en service en 2002, est destiné à l'entreposage des combustibles usés du réacteur BR3 du SCK•CEN.
- Le bâtiment 155, mis en service en 2005, est conçu pour accueillir des déchets de catégorie B. Il comporte une aile radifère et une aile non radifère, destinée notamment à des déchets du HRA/Solarium et aux déchets A3X.

En 2003, l'ONDRAF a entamé un programme d'inspection de tous les colis de déchets conditionnés présents sur les sites BP1 et BP2, qui s'étendra en principe sur une dizaine d'années. Les fûts identifiés comme non conformes, qui datent tous des années 1980 et n'avaient pas encore été soumis au processus d'acceptation de l'ONDRAF, font l'objet de mesures conservatoires pour leur entreposage avant mise en dépôt, voire seront mis en conformité.

Fin 2005, les bâtiments d'entreposage de Belgoprocess abritaient 17 714 m^3 de déchets conditionnés des catégories A, B et C, sur une production totale d'ici 2070 estimée à environ 83 000 m^3. La capacité actuelle d'entreposage pour les déchets de catégorie A devrait être suffisante si ceux-ci peuvent être mis en dépôt à partir de 2016 environ. Les capacités d'entreposage disponibles pour les déchets des catégories B&C permettent de couvrir les besoins actuellement connus.

2. Évacuation

Selon le consensus international, l'évacuation des déchets radioactifs doit garantir un héritage nucléaire sûr et bien maîtrisé aux générations futures, tout en leur évitant des charges techniques et financières excessives. Pour les déchets de catégorie A, le Gouvernement fédéral a fait le choix de la mise en dépôt en surface sur le territoire de la commune de Dessel ; le programme de travail est actuellement en phase de projet. Pour les déchets des catégories B&C par contre, aucune décision n'a encore été prise, de sorte que les études sont toujours au stade de la RD&D métho-

dologique, se focalisant sur la solution de référence de la mise en dépôt géologique dans l'Argile de Boom.

a. Le programme catégorie A

Le programme catégorie A a franchi un cap important avec la décision du Gouvernement fédéral, le 23 juin 2006, d'opter pour la mise en dépôt en surface des déchets de catégorie A sur le territoire de la commune de Dessel. Cette décision couronne vingt années de travaux, qui peuvent être divisées en deux phases :

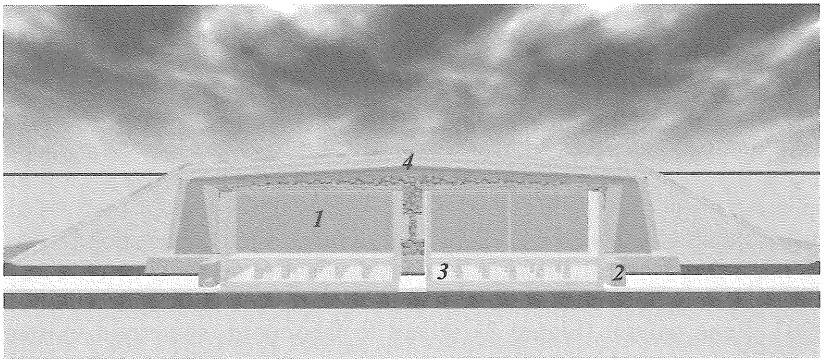
- une phase d'études exploratoires, de 1985 à 1997, qui a permis des progrès scientifiques et techniques substantiels en matière de dépôt en surface, mais qui, par manque de prise en compte des aspects sociétaux, n'a pas pu aboutir à l'identification de sites tels que la mise en dépôt non seulement y eût été sûre et faisable, mais aussi qu'elle y eût été acceptée par les populations locales. Cette phase s'est clôturée avec la décision du Conseil des ministres du 16 janvier 1998 d'opter pour une solution définitive ou à vocation définitive – en d'autres termes, un dépôt final, en surface ou en profondeur – progressive, flexible et réversible pour la gestion à long terme des déchets de catégorie A. Le Conseil des ministres demandait également à l'ONDRAF « de développer les méthodes, y compris les structures de gestion et de concertation, permettant d'intégrer un projet de cette nature au niveau local » ;
- une phase d'avant-projet, de 1998 à mi-2006, qui s'est appuyée sur les connaissances et l'expérience existantes, mais qui était radicalement différente de la phase précédente en ce qu'elle reposait notamment sur les deux idées nouvelles suivantes :
  - l'idée de participation locale, sur une base volontaire, dans le cadre de structures de partenariat à établir entre l'ONDRAF et les communes intéressées ;
  - l'idée d'intégration du projet de dépôt en développement au niveau local, en donnant aux populations locales la possibilité d'avoir un impact sur le projet et de faire en sorte qu'il rencontre leurs valeurs et leurs préoccupations, en lui associant un ensemble de conditions.

L'approche des partenariats locaux, qui suscite un intérêt certain au niveau international, a conduit à la création de trois partenariats avec, respectivement, les communes de Dessel, de Mol, et de Fleurus-Farciennes. Les partenariats STOLA-Dessel à Dessel et MONA à Mol ont chacun développé un avant-projet intégré de dépôt en surface et un avant-projet intégré de dépôt en profondeur. Ces avant-projets ont été approuvés par les assemblées générales des partenariats et ensuite par les conseils communaux des communes concernées, après quoi ils ont été soumis au Gouvernement fédéral. Le partenariat PaLoFF a également développé un

avant-projet intégré de dépôt final, mais ses travaux ont été arrêtés par décision des conseils communaux de Fleurus et de Farciennes.

Avec la décision du Gouvernement fédéral d'opter pour l'avant-projet intégré de dépôt en surface de STOLA-Dessel (Figure 2), le programme catégorie A est passé en phase de projet, c'est-à-dire à la phase qui doit amener l'avant-projet de son stade actuel au stade de projet prêt à être mis en œuvre. Dans les prochaines années, le programme catégorie A se focalisera sur les études détaillées encore nécessaires pour pouvoir entamer la construction du dépôt, prévue à partir de 2011 dans le calendrier actuel, dans l'intention de commencer l'exploitation en 2016. Cet objectif implique en particulier le développement d'un mécanisme spécifique pour assurer le financement de la mise en œuvre des conditions émises au niveau local qui ne peuvent être couvertes par le fonds à long terme. L'approche participative sera plus importante que jamais : elle sera poursuivie et adaptée au fur et à mesure de l'évolution du dépôt. Ainsi, dans l'immédiat, une structure de collaboration sera mise en place entre les communes voisines de Mol et de Dessel, qui permettra notamment une prise en compte globale des conditions émises par les partenariats STOLA-Dessel et MONA. Dans tous les cas, la mise en œuvre concrète du projet intégré restera conditionnée par l'obtention d'un accord entre les parties concernées ainsi que par l'obtention des autorisations et permis nécessaires de la part des autorités compétentes.

Figure 2 : L'avant-projet de dépôt final en surface développé par STOLA-Dessel [crédit STOLA-Dessel]



Cet avant-projet prévoit la construction de deux doubles rangées de modules de dépôt (1 – une seule double rangée). Des galeries d'inspection (2) courent de part et d'autre des doubles rangées de modules et chacun de ceux-ci possède une cave visitable (3). Une fois remplies, les deux doubles rangées de modules sont recouvertes d'une protection multicouche (4).

b. Le programme B&C

Depuis le début des années 1970, la Belgique étudie la mise en dépôt géologique dans l'Argile de Boom en tant que solution possible pour la gestion à long terme des déchets des catégories B&C. Initiées par le SCK•CEN, les études relatives au dépôt géologique se sont en effet très vite focalisées sur les argiles, et en particulier sur l'Argile de Boom, s'accompagnant très tôt dans le programme de la construction d'un laboratoire souterrain. Elles ont été poursuivies par l'ONDRAF en raison de leur caractère prometteur et, petit à petit, la mise en dépôt géologique au sein de l'Argile de Boom s'est imposée comme *solution de référence*.

La mise en dépôt géologique s'inscrit dans la ligne des recommandations en vigueur au niveau international pour assurer une gestion à long terme éthiquement responsable et sûre de ce type de déchets ainsi que dans les possibilités prévues par le cadre légal qui régit les missions de l'ONDRAF. L'ONDRAF l'estime incontournable pour les déchets existants et les déchets à produire dans le cadre du programme électronucléaire actuel, mais aussi dans l'hypothèse de la mise en œuvre de filières nucléaires avancées, dans la mesure où celles-ci ne permettront pas d'éviter la production de déchets ultimes. L'ONDRAF souhaite par ailleurs la mettre en œuvre le plus rapidement possible, afin de limiter le recours à l'entreposage en surface.

D'après le rapport SAFIR (*Safety Assessment and Feasibility Interim Report*), publié en 1989, et le rapport SAFIR 2, publié en 2001, qui faisaient tous deux la somme des connaissances scientifiques et techniques acquises et évaluaient la confiance dans la sûreté et la faisabilité du système de dépôt étudié, l'Argile de Boom offre un potentiel élevé pour la mise en dépôt sûre des déchets des catégories B&C. Ces conclusions ont été confirmées en 2003 par la *peer review* internationale du rapport SAFIR 2 demandée par le Gouvernement fédéral et réalisées sous l'égide de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) : l'Argile de Boom apparaît jusqu'à présent exempte de vices rédhibitoires en termes de sûreté pour les déchets sur lesquels les études se sont concentrées jusqu'ici, à savoir essentiellement les déchets vitrifiés de haute activité issus du retraitement des combustibles usés. En outre, la construction en 2001-2002 d'une galerie (Figure 3) reliant le laboratoire souterrain existant HADES au second puits d'accès, construit en 1997-1999, a démontré la faisabilité de la construction de galeries de dépôt dans l'Argile de Boom par des méthodes industrielles.

Ceci dit, le programme de RD&D de l'ONDRAF ou, plus exactement, la solution de référence sur laquelle il repose n'a pas de légitimité formelle, en ce sens qu'elle n'a jamais été confirmée par une décision de

principe au niveau fédéral ni même été soumise au test de l'acceptabilité sociétale. Or les bases du programme de RD&D doivent être confirmées formellement au niveau fédéral pour que le programme B&C puisse passer de la phase méthodologique actuelle à la phase d'avant-projet et ainsi aller de l'avant.

Le manque de légitimité formelle de la solution de référence a été souligné par l'ONDRAF, à l'occasion de la publication du rapport SAFIR 2, ainsi que par les experts de l'AEN. Le ministre de tutelle de l'ONDRAF en a pris acte et a donné en 2004 pour mission à l'ONDRAF non seulement de poursuivre le programme de RD&D mais aussi de développer un programme de travail à orientation sociétale afin d'impliquer les différents preneurs d'enjeux, de définir un processus décisionnel partagé et d'analyser les alternatives possibles à la solution de référence.

Figure 3 : Vue générale de la galerie de liaison qui relie le laboratoire souterrain HADES au deuxième puits [crédit EURIDICE]



En réponse à la demande de 2004, l'ONDRAF a proposé différentes actions à son ministre de tutelle, qui constituent un ensemble à vocation stratégique appelé « Plan déchets ». Ce Plan, dont l'achèvement est prévu aux alentours de 2010, comprendra notamment une analyse des alternatives possibles au dépôt géologique dans l'Argile de Boom et une analyse de leurs incidences environnementales ainsi qu'un dialogue sociétal, qui portera en particulier sur le programme B&C. L'analyse des incidences environnementales sera réalisée en conformité avec les obligations qui

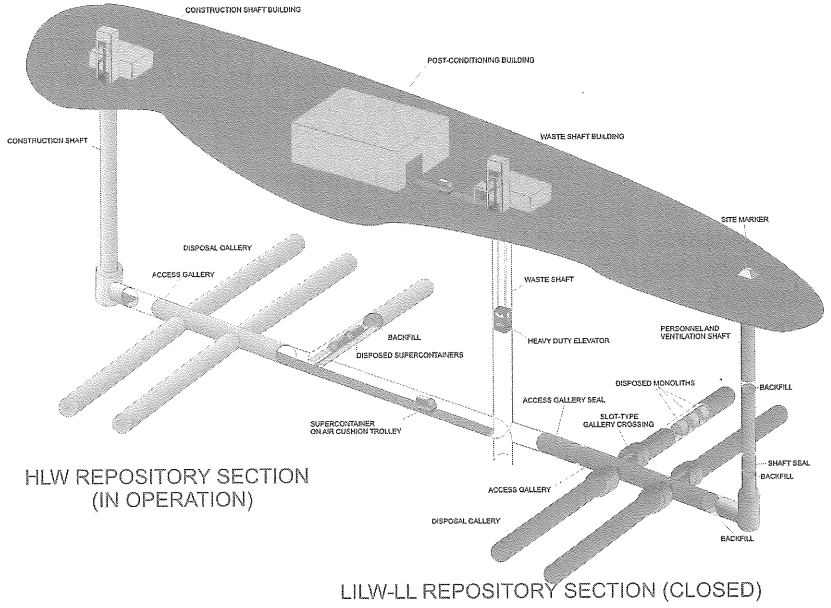
découlent de la loi du 13 février 2006 sur l'évaluation des incidences de certains plans et programmes sur l'environnement.

L'ONDRAF souhaite enclencher dès que possible la dynamique de *dialogue sociétal* autour de la gestion à long terme des déchets des catégories B&C, parvenir à une *légitimation sociétale* de ses travaux passés et obtenir ensuite à brefs délais une *décision de principe* du Gouvernement fédéral en matière de gestion à long terme de ces déchets. Si la décision prise confirme le choix du dépôt géologique dans l'Argile de Boom, le programme B&C pourrait passer en phase d'avant-projet et se focaliser alors sur le processus scientifique et sociétal qui doit conduire à l'identification d'un ou plusieurs sites de dépôt potentiels et à leur confirmation en termes de sûreté et de faisabilité.

En parallèle avec sa réflexion sur la manière d'entamer un dialogue sociétal autour du programme B&C, l'ONDRAF poursuit ce dernier sur les bases existantes. Après s'être focalisés sur les performances de l'Argile de Boom, les efforts portent à présent en particulier sur l'architecture du dépôt et le design de ses barrières ouvragées (Figure 4). Les expériences PRACLAY en cours de préparation à EURIDICE, et en particulier les expériences PRACLAY *in situ* en vraie grandeur (croisement de galeries et test de chauffe notamment), constitueront un des aspects essentiels du programme B&C durant les quinze prochaines années, que ce soit en termes de démonstration industrielle, de compréhension des phénomènes impliqués ou encore de confirmation des acquis.

Dans l'hypothèse d'une décision de principe confirmant la solution du dépôt géologique dans l'Argile de Boom, le prochain jalon technico-scientifique majeur, à savoir le *Safety and Feasibility Case 1* ou SFC 1, prévu pour 2013, assurera l'intégration de tous les arguments tendant à démontrer que la solution de référence est à la fois sûre et faisable pour tous les types de déchets des catégories B&C actuellement envisageables.

Figure 4 : L'installation de dépôt géologique actuellement envisagée pour les déchets des catégories B&C (différente de celle envisagée dans le rapport SAFIR 2)



Trois puits donnent accès à une galerie principale, qui dessert les galeries de dépôt, de diamètre plus petit. Celles-ci sont réparties en sections distinctes, destinées à recevoir, d'une part, les déchets vitrifiés et, le cas échéant, les combustibles usés et, d'autre part, les autres déchets.

D. Critères d'acceptation, agrément et acceptation des déchets

La sûreté de la gestion des déchets radioactifs dépend non seulement de la conception et de la mise en œuvre des installations de gestion, ainsi que du choix d'un site de dépôt adéquat dans l'hypothèse d'une mise en dépôt final, mais aussi de la « qualité » des déchets. Les déchets doivent posséder des caractéristiques qui soient compatibles avec les exigences imposées par les étapes ultérieures de leur gestion, comme les transports, le traitement et le conditionnement (pour les déchets non conditionnés), l'entreposage et, au bout du compte, la solution envisagée pour leur gestion à long terme, en l'occurrence la mise en dépôt final.

La compatibilité des déchets avec les exigences imposées par les étapes ultérieures de leur gestion est assurée par le *système d'acceptation*, qui comporte trois étapes.

- L'établissement, par l'ONDRAF, des critères auxquels les déchets non conditionnés et conditionnés doivent satisfaire pour que l'ONDRAF accepte de les prendre en charge, ainsi que l'établissement des procédures stipulant les modalités du transfert de propriété de ces déchets des producteurs à l'ONDRAF. Les critères d'acceptation ont été établis pour une partie des déchets, sur la base des règles générales élaborées par l'ONDRAF, conformément aux dispositions de l'arrêté royal du 16 octobre 1991, et approuvées par l'autorité compétente en février 1999.
- L'agrément, par l'ONDRAF, conformément aux dispositions de l'arrêté royal du 18 novembre 2002, des installations et des procédés de traitement et de conditionnement, c'est-à-dire la confirmation de ce que ces installations et procédés sont aptes à produire des déchets conformes aux critères d'acceptation applicables, l'agrément des méthodes de détermination du contenu radiologique et des caractéristiques physico-chimiques des déchets non conditionnés et conditionnés, ainsi que l'agrément des bâtiments d'entreposage.
- L'acceptation des colis de déchets par l'ONDRAF après vérification administrative et technique de leur conformité aux critères d'acceptation applicables.

L'élaboration de règles générales et de critères d'acceptation constitue une des avancées les plus notables de la période 1990-2005 en matière de gestion et d'assurance de la qualité des déchets radioactifs. Les règles générales doivent encore être complétées pour permettre l'acceptation en entreposage des quantités excédentaires de matières nucléaires. Les critères existants doivent, eux, être complétés afin de permettre l'acceptation des déchets non encore couverts. Règles et critères pourraient devoir être adaptés ultérieurement, par exemple si les autorités compétentes dans le cadre de la procédure d'autorisation pour une installation de dépôt final venaient à formuler des exigences particulières.

III. Gestion des quantités excédentaires de matières nucléaires

L'ONDRAF n'ayant encore reçu aucune demande de gestion de matières fissiles enrichies, de matières plutonifères ou de combustible neuf, ses activités dans le domaine de la *gestion des quantités excédentaires de matières nucléaires* se limitent actuellement à l'établissement des règles générales pour l'acceptation de ces matières en entreposage.

IV. Déclassement et assainissement des passifs

La loi du 11 janvier 1991 et l'arrêté royal d'exécution du 16 octobre 1991 impliquent l'ONDRAF dans la gestion du déclassement des installations nucléaires présentes sur le territoire belge et le chargent de l'exécution des programmes de déclassement pour le compte des exploitants qui en font la demande. C'est donc logiquement que l'État a aussi confié à l'ONDRAF la gestion de l'assainissement des passifs nucléaires des sites BP1 et BP2, du SCK•CEN et de l'IRE, de même que la gestion du dossier Transnuklear.

A. Déclassement

Conformément aux dispositions de l'arrêté royal du 16 octobre 1991, l'ONDRAF a conclu des accords et protocoles d'accords avec les exploitants d'installations nucléaires, dans lesquels est notamment précisée l'obligation pour les exploitants d'établir des plans de déclassement pour leurs installations selon les recommandations émises par l'ONDRAF.

Les activités de l'ONDRAF en matière de déclassement se répartissent actuellement comme suit :

- l'élaboration et la révision quinquennale des plans de déclassement des installations des sites BP1 et BP2 construites par l'ONDRAF et ne faisant pas partie des passifs nucléaires ;
- l'élaboration ou l'analyse et l'accord sur les plans de déclassement (et leurs révisions) relatifs aux passifs nucléaires ;
- l'analyse et l'accord sur les plans de déclassement (et leurs révisions) qui lui sont soumis par les exploitants d'installations nucléaires ou, le cas échéant, l'assistance à l'élaboration de ces plans ;
- la gestion globale et la supervision des opérations de démantèlement effectuées depuis 1989 dans le cadre de l'assainissement des passifs des sites BP1 et BP2 et du SCK•CEN.

Mis à part les travaux en cours dans le cadre de l'assainissement des passifs des sites BP1 et BP2 et du SCK•CEN, il n'y a donc pas encore de chantiers de déclassement importants en Belgique. L'ONDRAF a cependant marqué son accord sur le plan de déclassement final de Belgonucleaire fin 2005.

B. Assainissement des passifs nucléaires

L'assainissement des principaux passifs nucléaires, ceux des sites BP1 et BP2 et celui du SCK•CEN, regroupe l'ensemble des travaux nécessaires pour déclasser toutes les installations de ces sites qui sont antérieures au 1er janvier 1989 ainsi que pour gérer l'ensemble des déchets radioactifs produits avant cette date ou générés lors des travaux de déclassement. Ces

travaux comportent en règle générale deux volets : un volet déchets, qui peut comprendre un aspect matières fissiles, et un volet démantèlement. L'assainissement des passifs BP1 et BP2 a été confié par l'ONDRAF à Belgoprocess ; celui du passif du SCK•CEN a été confié au SCK•CEN.

L'assainissement des *passifs déchets* a considérablement progressé depuis 1989.

- Belgoprocess avait, fin 2005, résorbé une partie de son passif déchets. Les travaux d'assainissement déjà réalisés ont nécessité la mise au point, par Belgoprocess, de nouveaux procédés de traitement et de conditionnement ainsi que de nouvelles méthodes de caractérisation des déchets mal connus, de même que des investissements importants par l'ONDRAF. Deux groupes de déchets en particulier ont nécessité des efforts intensifs : les déchets dits du « HRA/Solarium » (déchets radifères, déchets non radifères et déchets spéciaux) et les déchets dits « A3X » (déchets contaminés en émetteurs alpha), pour lesquels toutes les solutions de traitement et de conditionnement nécessaires sont maintenant disponibles.
- Le SCK•CEN a achevé de résorber son passif déchets hors matières fissiles en 1996 et a largement résorbé son passif en matières fissiles. Une petite partie des combustibles usés du réacteur de recherche BR2 a été envoyée en 1994 à UKAEA Dounreay pour retraitement et le solde a été envoyé entre 1998 et 2003 à La Hague pour retraitement par COGEMA. Les combustibles usés du réacteur de recherche BR3, trop hétérogènes pour être retraités, ont été transférés en 2002 dans le nouveau bâtiment d'entreposage 156, sur le site BP1.
- Les travaux de démantèlement ont bien progressé également. Les deux plus gros projets de démantèlement en cours à ce jour sont le démantèlement du bâtiment principal de l'ancienne usine pilote de retraitement Eurochemic (bâtiment 101) sur le site BP1 et celui du réacteur BR3.
- Le démantèlement d'Eurochemic a débuté en 1990 et les gros travaux devraient s'achever vers 2015. Les travaux de démolition conventionnelle du bâtiment 101 sont prévus à partir de la mi-2008.
- Le démantèlement du réacteur BR3, qui a débuté en 1989, devrait s'achever en 2009. Il s'agit du premier projet de démantèlement d'un réacteur à eau pressurisée en Europe. À terme, les techniques utilisées pourraient être transposées à la décontamination et au démantèlement des réacteurs nucléaires belges à usage commercial.

Le déclassement des installations nucléaires belges constituera la principale source (en volume) de déchets radioactifs que l'ONDRAF aura à gérer dans le futur. La volonté de minimiser les volumes de déchets produits au cours des opérations de démantèlement se traduit notamment par la mise au point de techniques de décontamination de surfaces et un

recyclage des matériaux décontaminés. Seuls quelques pour cent environ des matériaux présents sur un site nucléaire devraient en fin de compte être gérés en tant que déchets radioactifs.

C. Dossier Transnuklear

L'ONDRAF a reçu la responsabilité de la gestion du dossier Transnuklear en 1989 et a pris les mesures nécessaires pour que les déchets Transnuklear soient progressivement renvoyés en Allemagne, après avoir fait l'objet de diverses campagnes de traitement et de conditionnement à Belgoprocess. L'exécution de l'accord belgo-allemand s'est étalée sur une douzaine d'années, en raison de la complexité du système d'autorisation applicable aux opérations transfrontalières telles que les opérations d'importation et de transfert de déchets radioactifs. Ce dossier est désormais clôturé.

V. Inventaire des passifs nucléaires

La mission d'inventaire des passifs nucléaires vise à permettre au Gouvernement fédéral de prendre les mesures nécessaires pour éviter l'apparition de nouveaux passifs nucléaires. Elle permet aussi à l'AFCN de suivre l'évolution des activités qu'elle autorise.

Le premier rapport relatif à l'inventaire des passifs nucléaires a couvert la période 1998-2002. Il comporte notamment un répertoire des sites de classe I, II et III présents sur le territoire belge, ainsi qu'une analyse de l'existence et de la suffisance des provisions constituées par les exploitants ou propriétaires des installations nucléaires afin de couvrir le coût nucléaire total de ces sites et installations, lequel comprend entre autres les coûts de démantèlement et les coûts de transport, de traitement, de conditionnement, d'entreposage et de mise en dépôt final des déchets radioactifs.

Le répertoire établi par l'ONDRAF comprenait au 1er juillet 2002 un total de 1064 sites répartis entre 951 exploitants nucléaires détenteurs de 3510 autorisations. Le coût total de déclassement et d'assainissement des sites nucléaires existants, y compris le coût d'assainissement des passifs nucléaires existants et le coût de la gestion des déchets radioactifs, a été estimé à 5,7 milliards EUR. Il est lié pour l'essentiel à une quinzaine de sites. D'après les informations dont l'ONDRAF a pu avoir connaissance, ce coût est couvert à raison de 85 % par les provisions existantes ou par les provisions qui seront constituées dans le cadre des mécanismes de financement existants. La couverture des 15 % restants devra être assurée par des mécanismes à mettre en place, de manière à éviter l'apparition de nouveaux passifs nucléaires. Le deuxième rapport d'inventaire est prévu pour début 2008.

Les principales avancées réalisées suite aux recommandations formulées par l'ONDRAF dans le premier rapport d'inventaire sont les suivantes :

- établissement d'un financement structurel, garanti via une cotisation fédérale à charge du secteur de l'électricité, pour couvrir le coût de l'assainissement des passifs nucléaires BP1 et BP2. Ce financement est organisé selon les dispositions de la loi-programme du 24 décembre 2002 et de l'arrêté royal du 24 mars 2003 ; les montants destinés au financement des passifs pour la période 2004-2008 sont fixés par l'arrêté royal du 19 décembre 2003, confirmé par la loi du 27 décembre 2004. Ce financement met un terme aux aléas du système conventionnel en vigueur précédemment ;
- établissement de mécanismes relatifs à la constitution des provisions nécessaires au démantèlement des centrales nucléaires et à la gestion des combustibles usés. Ces mécanismes sont fixés par les dispositions de la loi du 11 avril 2003. Ils portent notamment sur le contrôle de la constitution des provisions, de leur suffisance et de l'utilisation des moyens financiers correspondants, ainsi que sur les garanties destinées à assurer la disponibilité future des provisions. Le directeur général de l'ONDRAF ou son délégué peut assister avec voix consultative aux réunions du Comité, dit « de suivi », créé afin de contrôler ces différents mécanismes et l'avis conforme de l'ONDRAF est requis pour les résolutions du Comité qui concernent l'existence et la suffisance des provisions.

VI. Dossier Umicore

L'ONDRAF est impliqué dans le dossier Umicore à deux titres.

- En tant qu'organisme responsable de la gestion des déchets radioactifs en Belgique, l'ONDRAF devra prendre en charge la gestion des déchets radioactifs qui seront issus de l'assainissement de la décharge D1 et de tous les terrains contaminés au radium situés tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'enceinte du site d'Umicore à Olen. Dans cette optique, l'ONDRAF collabore avec les autorités fédérales (AFCN) et régionales (OVAM, etc.) ainsi qu'avec Umicore pour définir les scénarios à mettre en œuvre pour assainir le site d'Umicore et ses environs.
- En vertu des dispositions de l'arrêté royal du 20 juin 1995, l'ONDRAF devra joindre un avis au rapport qu'Umicore doit, selon ce même arrêté, soumettre à l'AFCN au sujet des mesures de gestion à long terme à prendre concernant les déchets actuellement entreposés à titre provisoire dans l'installation autorisée de classe II construite à cet effet sur le site d'Olen. L'ONDRAF suit donc l'étude qu'Umicore mène dans ce cadre afin de dégager une solution de gestion à long terme.

VII. Financement

La totalité des coûts de l'ONDRAF est supportée au prix coûtant par les bénéficiaires de ses prestations, autrement dit par les producteurs de déchets radioactifs et par l'État belge, en sa qualité de responsable financier des passifs nucléaires existants. Le principal acquis de la période 1990-2005 en matière de financement est sans conteste la mise au point, conformément aux dispositions de l'arrêté royal du 30 mars 1981, d'un outil financier pour le financement des opérations techniques de *gestion à long terme*. Le fonds à long terme, qui assure à l'ONDRAF la couverture de ses coûts fixes, et qui lui assure la couverture de ses coûts variables au fur et à mesure qu'ils apparaissent, est devenu opérationnel en 1999, après une longue période de préparation.

Le mécanisme d'approvisionnement du fonds à long terme repose sur les trois idées fondamentales suivantes :

- la réservation de capacité, par laquelle chacun des principaux producteurs annonce à l'ONDRAF son programme total de production de déchets, ce qui permet à l'ONDRAF de répartir ses coûts fixes entre les producteurs ;
- le paiement tarifaire, par lequel chaque producteur verse au fonds à long terme une contribution correspondant au coût total (marges d'incertitude incluses) de la gestion à long terme des déchets qu'il remet à l'ONDRAF ;
- la garantie contractuelle, par laquelle chacun des principaux producteurs s'engage à verser au fonds à long terme le solde des coûts fixes imputables à ses déchets qui n'auraient pas déjà été couverts par des paiements tarifaires.

Au 31 décembre 2005, l'actif total du fonds à long terme *pour la mise en dépôt final* des déchets radioactifs se montait à 88 $MEUR_{2005}$, répartis en 50 $MEUR_{2005}$ pour le dépôt en surface et 38 $MEUR_{2005}$ pour le dépôt géologique. Ces chiffres peuvent être reliés aux coûts estimés, d'une part, de la construction, de l'exploitation, de la fermeture et de la surveillance et du contrôle après fermeture de l'installation de dépôt en surface de STOLA-Dessel pour les déchets de catégorie A et, d'autre part, de la construction, de l'exploitation et de la fermeture de l'installation de dépôt géologique en cours de développement pour les déchets des catégories B&C. Les coûts de base non actualisés affectés de leurs marges d'incertitudes conduisent aux fourchettes de coûts suivantes :

- installation de dépôt en surface de STOLA-Dessel : 360 à 490 $MEUR_{2005}$;
- installation de dépôt géologique (estimations basées sur le concept de dépôt décrit dans le rapport SAFIR 2) :

- en cas de reprise du retraitement : 890 à 1310 MEUR2005 ;
- en cas d'abandon définitif du retraitement : 1250 à 2140 $MEUR_{2005}$.

VIII. Considérations finales[4]

Les défis actuels en matière de gestion des déchets radioactifs se concentrent sur la gestion à long terme. Outre les aspects scientifiques et technologiques, qui requièrent encore des efforts soutenus, particulièrement en ce qui concerne la mise en dépôt géologique, deux aspects potentiellement décisifs dont l'importance tend à être sous-estimée recevront une attention particulière de la part de l'ONDRAF dans les années qui viennent : le dialogue sociétal et le manque actuel de politique institutionnelle en ce qui concerne la gestion à long terme des déchets des catégories B&C.

- Le programme catégorie A, actuellement en phase de projet, se focalisera dans les prochaines années sur les études détaillées encore nécessaires pour amener le projet intégré de dépôt final de STOLA-Dessel au stade de la mise en œuvre, prévue à partir de 2011 dans le calendrier actuel, dans l'intention de commencer l'exploitation en 2016. L'approche participative sera poursuivie et adaptée au fur et à mesure de l'évolution du dépôt.
- En parallèle avec les études de RD&D et l'instauration d'un dialogue sociétal, le programme B&C visera à obtenir le plus rapidement possible du Gouvernement fédéral une décision de principe relative à la gestion à long terme de ces déchets. Si la décision prise confirme le choix du dépôt géologique dans l'Argile de Boom, le programme B&C pourrait passe du stade actuel des études de RD&D méthodologique à la phase d'avant-projet et se focaliser alors sur le processus scientifique et sociétal qui doit conduire à l'identification d'un ou plusieurs sites de dépôt potentiels et à leur confirmation en termes de sûreté et de faisabilité.

[4] Pour de plus amples informations, veuillez prendre contact avec le service Communication de l'ONDRAF au 02 212 10 39 ou vous rendre sur le site www.nirond.be. Vous pouvez également visiter les sites www.euridice.be et www.belgoprocess.be.

Belgonucleaire 1990-2005

Jean VAN VLIET, Alain MICHEL et Léon BINDLER

Directeur général de Belgonucleaire
Consultant
Belgonucleaire

I. Introduction

Ces années ont été pour Belgonucleaire, en abrégé BN, l'époque de la pleine activité de son usine de fabrication de combustible MOX, avec des fabrications pour la France, l'Allemagne, la Belgique, la Suisse et le Japon. Durant cette période, l'usine fut également modernisée pour faire face aux dernières exigences en matière de qualité et de sûreté. Ce furent aussi les années au cours desquelles le bureau d'études contribua à l'évolution continue des équipements et des techniques et à leur transposition vers la France, les États-Unis et le Japon. En parallèle, BN a apporté un soutien aux utilisateurs de combustible MOX, notamment par la conduite de programmes d'irradiation. Enfin, BN a réalisé plusieurs installations de traitement des déchets, en particulier pour ceux contenant du plutonium.

C'est au cours de ces années également que BN a soutenu les débats politiques qui ont conduit à l'adoption du recyclage du plutonium militaire par les USA et la Russie. Elle a participé activement à la préparation de la construction de l'usine américaine et au projet russe.

Ces différentes activités ont évidemment des points communs et interfèrent entre elles. Plutôt que de les traiter en suivant une stricte chronologie et par souci de clarté, nous avons choisi de les présenter de manière séparée. Une telle présentation ne permet cependant pas de mettre en avant l'avantage considérable qu'avait BN en combinant au sein d'une même PME, les compétences de ces différents secteurs.

II. L'usine de fabrication de combustible MOX

Dans les années 1960 et 1970, la Belgique et la France ont développé des technologies pour la fabrication de combustibles nucléaires contenant du plutonium destinés aux réacteurs thermiques et rapides.

Sans remonter jusqu'à la naissance de la technique de fabrication du MOX par le Groupe Mixte réuni au sein du CEN/SCK (voir le volume « Un demi-siècle de nucléaire en Belgique »), il faut rappeler que la première mise en service de l'usine date de 1972. Conçue à l'origine pour traiter le plutonium produit dans l'usine de retraitement d'Eurochemic (située sur le site voisin devenu celui de Belgoprocess), l'usine a démarré son activité par la fabrication de MOX de démonstration pour les premières centrales à eau légère : entre autres Garigliano en Italie, Oskarshamn en Suède, Doodewaard aux Pays-Bas et pour le réacteur d'essais BR3 à Mol.

L'usine a ensuite élargi sa production à la fabrication de combustible pour les réacteurs à neutrons rapides dans le cadre de la mise au point, puis de la fabrication d'une partie significative du premier cœur de la centrale SNR-300 à Kalkar (projet belgo-germano-néerlandais). Ces tâches ont été effectuées de 1974 à 1985. On se souviendra que le projet SNR-300 a été interrompu par suite des pressions des mouvements et des partis écologistes, en Allemagne principalement. En 1991, la société Siemens qui possédait l'usine de Hanau et qui avait fabriqué l'autre partie du combustible pour le cœur de SNR-300, fut contrainte de fermer son site. À peu près à la même époque, le gouvernement belge décidait de se retirer du projet. En arrière-plan, il faut encore rappeler la position prise dès 1976 par l'administration du président Carter qui allait mettre fin au recyclage du plutonium aux États-Unis, et remettre fondamentalement en question le recyclage des combustibles nucléaires.

Pour BN, le moratoire de fait dès 1984 représentait la fin du programme pour les réacteurs rapides, mais le retraitement et le recyclage du plutonium ainsi séparé des combustibles LWR dans ces mêmes réacteurs représentait une importante activité potentielle. À cette époque, l'usine UP2 de la Cogema à La Hague avait atteint sa capacité nominale et les stocks de plutonium issus de combustibles à taux de combustion de plus en plus élevés, augmentaient et prenaient de l'âge, ce qui rendait leur manipulation ultérieure plus délicate (accroissement de radioactivité, présence d'américium, etc.).

En 1984, Belgonucleaire et ses partenaires français Cogema, CEA et Fragema ont décidé de collaborer pour poursuivre le développement de la technologie du MOX : cette collaboration allait se poursuivre jusqu'en 2005.

À l'époque, seuls Siemens et BN disposaient de la technique permettant de réaliser un MOX répondant aux exigences des réacteurs à eau légère. Un nouveau procédé a été mis au point à Belgonucleaire en 1984, le procédé MIMAS par lequel on obtenait un combustible répondant aux nouvelles exigences de solubilité en fin de vie permettant le retraitement du MOX. Cette technique comprend la fabrication d'un mélange primaire dit *master-blend* dans lequel un mélange de 20 à 30 % d'oxyde de plutonium est micronisé avec de la poudre d'oxyde d'uranium (UO_2) et des rebuts de fabrication. Ce mélange est ensuite dispersé de manière contrôlée dans de l'UO_2 dit « *free-flowing* » pour atteindre l'enrichissement désiré.

C'est la décision d'EDF de recycler sans attendre le plutonium issu du retraitement qui a principalement motivé la transformation de l'usine à partir de 1985. Alors qu'une capacité maximale de 40 t/an est autorisée par arrêté royal, la capacité nominale initiale a été portée à 35 t/an. Un investissement de 780 MBEF est engagé dont 330 en fonds propres et 450 en crédit d'investissement, avec 126 MBEF en bonification d'intérêt par l'État. L'usine va connaître simultanément au cours d'une même année la fabrication des derniers crayons pour réacteurs à neutrons rapides, le démantèlement partiel et l'installation du nouveau procédé. De nouveaux équipements sont conçus et mis au point par BN : fabrication des mélanges primaires et secondaires, four de séchage, remplissage et soudage sans contamination des crayons, contrôles non destructifs des crayons, etc.

La collaboration avec la France se poursuit par la conclusion d'accords qui permettront un transfert de connaissances vers l'usine du CEA de Cadarache (qui sera reprise en 1991 par Cogema) et vers l'usine de Cogema à construire à Marcoule, Melox.

Avec l'abandon d'Eurochemic, BN devient totalement dépendante de ses relations avec Cogema et ses usines de retraitement pour l'approvisionnement en plutonium. Le transport de plutonium depuis la Grande-Bretagne a pu être réalisé en 1987-1988, mais l'obligation de transporter le plutonium par voie maritime pose des problèmes considérables, plus politiques que techniques d'ailleurs. FBFC International, usine voisine de BN qui fabrique à l'époque du combustible UO_2 pour Fragema, va se charger de la réalisation des assemblages, BN se concentrant sur son activité sur les crayons MOX. FBFC sera progressivement intégrée dans la famille des usines françaises de Framatome d'abord, puis d'Areva. Une société de marketing et de vente est fondée fin 1984 par BN avec Cogema : ce sera le Groupement d'intérêt économique Commox.

D'une façon générale et tenant compte des différents acteurs présents sur le marché du combustible MOX, le rôle de BN sera limitée à celui de sous-traitant des fournisseurs (« vendors ») de combustible qu'étaient à l'époque Fragema, Siemens, Westinghouse et plus tard les japonais

Toshiba/Hitachi. C'est ainsi qu'en 1986, BN obtient de Fragema un plan de commande qui l'engage jusqu'en 1994. Dans la ligne des fabrications de démonstration destinées à la centrale des Ardennes, la SENA à Chooz avait décidé dès 1985 d'utiliser deux recharges successives de MOX et à l'exception des recharges de plus en plus importantes du BR3 (depuis la toute première démonstration à l'échelle mondiale de 1963), la première charge industrielle de 8 t de MOX sera livrée pour la centrale EDF de St Laurent des Eaux sur la Loire. Le chargement sera effectué en 1987, à la satisfaction du client et de ses autorités de sûreté.

C'est le début d'une longue série : l'usine atteint la pleine charge en 1989 puis maintient un rythme de 35 à 40 t/an jusqu'en 2005. Avec un personnel qui atteindra 256 techniciens et ingénieurs, BN va produire en un peu moins de 20 ans 657 t de MOX, jusqu'à l'arrêt des fabrications dans le courant de l'été 2006. Elle reste actuellement le premier producteur par la diversité de ses productions, puisqu'elle est à ce jour seule à avoir fabriqué tous les types de combustible MOX présents sur le marché des réacteurs à eau légère.

Tableau 1 : Les principaux clients de BN
20 centrales réparties dans 5 pays

France	Saint Laurent B1 et B2
	Gravelines 3 et 4
	Dampierre 1 et 2
	Blayais 2
Allemagne	Gundremmingen
	Grafenrheinfeld
	Philippsburg 2
	Broksdorf
	Grohnde
	Unterweser
	Isar
Suisse	Beznau
	Goesgen
Belgique	Doel 3
	Tihange 2
Japon	Fukushima 1-3
	Kashiwazaki 3

On constate la grande diversité de cette clientèle finale, avec cependant un poids important de la France jusque 1993. De fait, à la fin des années 1980, deux usines de retraitement étaient exploitées sur le site de La Hague : UP2 et UP3. Cogema a alors proposé à BN de participer au financement d'une extension dite P1 de l'usine de Dessel soit 35 t/an supplémentaires. Cogema assurerait la pleine charge de l'extension pour 10 ans au moins et financerait son démantèlement en fin d'exploitation.

Un projet tenant compte des dernières évolutions de la technique MOX a été élaboré très complètement à partir de 1987 et la construction a été autorisée par arrêté royal en avril 1991.

La situation des stocks de plutonium en 1990 justifie parfaitement cette décision : plus de 72 t ont déjà été extraites des combustibles usés civils. Sans parler des stocks militaires qui s'élevaient selon les estimations d'alors à plus de 250 t. Nous reparlerons de ce point plus loin ainsi qu'au chapitre 6 du présent livre.

C'est malheureusement alors le début d'un long combat avec les opposants au nucléaire en Belgique. Ceux qu'Arsène Burny a appelés « les semeurs de peurs qui sont volontiers écoutés même si leurs motivations sont troubles », ont déployé leurs forces tant vers le public qu'auprès des gouvernants. La loi n'exige pas la publication au Moniteur belge de ce type d'autorisation, mais cette absence de publicité a permis aux groupes antinucléaires de propager l'idée que la réalisation de l'extension P1 se ferait dans le secret. Greenpeace entama le combat par des questions insidieuses dans différentes arènes. De mars à mai 1992, ce mouvement entre en campagne avec l'appui de deux parlementaires locaux : manifestations, sit-in à Dessel, interpellations parlementaires, etc. La presse décide de monter « l'affaire » en épingle. Mais le gouvernement maintient son autorisation.

En juin 1992, deux événements qui vont marquer l'avenir du MOX ont lieu presque simultanément : le 18 juin, Electrabel introduit une demande d'autorisation pour utiliser du combustible MOX dans ses réacteurs Tihange 2 et Doel 3. Le 23 juin 1992, les groupes antinucléaires introduisent devant le Conseil d'État, un appel sur le décret autorisant P1. Parmi des arguments fallacieux, il y en a malheureusement un qui va conduire à annulation : une légère erreur de procédure dans le processus réglementaire d'autorisation. Le Conseil d'État va mettre 6 ans avant de confirmer cela en octobre 1998. Mais les conseillers juridiques de BN étant formels sur la haute probabilité de cette annulation et l'impossibilité de répéter la procédure en temps utile, BN doit renoncer à l'extension P1. Un investissement de 125 MEUR, 160 emplois supplémentaires à Dessel et l'espoir d'exporter pour 50 MEUR de chiffre d'affaires par an, sont perdus sur une maladresse administrative. De son côté, Cogema n'est pas restée inactive et a au contraire « poussé les feux » sur le chantier Melox : elle s'intéresse de moins en moins à BN. Une occasion unique de pérennité a disparu. Le projet technique est cependant maintenu en vie et servira de base à des offres d'ingénierie à l'étranger dont nous parlerons plus loin.

Le débat MOX va se poursuivre devant le Parlement et dans la rue. Greenpeace va même tenter de bloquer l'usine de Dessel physiquement. Mais l'autorisation de recycler le plutonium issu du combustible belge en

cours de retraitement à La Hague sera obtenue. Cette autorisation va permettre la fabrication de MOX pour les réacteurs belges pendant 10 ans à partir de 1994, recharges à fournir à partir de 1995 soit 66 t de MOX au total.

En 1993, l'usine annonce la fabrication de son 100 000e crayon ; fin septembre, le cap des 200 t fabriquées est dépassé. Mais l'avenir du recyclage du plutonium reste incertain malgré l'assurance que donne un nouvel accord avec la France en 1995 de fabriquer 120 t de MOX entre 2001 et 2006. Le démantèlement de l'usine de Hanau de Siemens est décidé en 1995. On parle de moratoire sur l'extension du nucléaire dans plusieurs pays d'Europe ; certains en décident immédiatement.

Heureusement le combustible MOX fourni par BN se comporte parfaitement. Les clients n'annoncent aucune rupture de crayons qui pourrait résulter de la fabrication. En 1997 BN garde encore un avantage sur Melox : l'adaptabilité de ses lignes de fabrication. De plus elle est seule à avoir alors l'expérience de la fabrication de MOX pour les BWR. Cette situation permet à BN d'engager de nouveaux investissements pour constamment améliorer son processus et diminuer les doses pourtant déjà très faibles, que reçoit le personnel. À ce sujet, il faut noter qu'en près de 35 ans de fonctionnement, il n'y eut jamais d'accident important dans cette usine. Les nouveaux investissements atteindront de 1995 à 1999, plus de 40 millions d'euros.

1999 sera l'année des premières livraisons hors d'Europe, au Japon. Mais ce sera aussi l'année où une falsification de données relatives à du combustible MOX fabriqué par BNFL et livré au Japon aura des conséquences majeures. Un marché potentiel de 500 t de MOX sera ainsi retardé *sine die*, sans aucune perspective sérieuse de redémarrage à mi-2006 : le MOX japonais reste bloqué par les incertitudes de la politique nipponne. Quand le recyclage du MOX sera-t-il largement autorisé ? À quel moment les Japonais pourront-ils mettre en service une usine MOX liée à leur usine de retraitement ? Il est impossible de le dire aujourd'hui.

1998, 1999 et les premières années 2000 sont très sombres sur le plan politique. Pour BN, la décision la plus lourde de conséquence se trouve sans doute dans les changements apportés à la loi atomique allemande : de manière successive, la loi qui prévoyait l'obligation de retraiter supprimera d'abord cette obligation, avant d'interdire purement et simplement le retraitement à partir de la mi-2005. En Belgique, le gouvernement prendra en 1998 la décision de la résiliation du dernier contrat de retraitement et d'un moratoire sur le retraitement. Cette décision sera suivie en 2003 par la décision d'arrêter les centrales belges entre 2015 pour les plus anciennes, et 2025 pour les plus récentes. Même dans le domaine de l'élimination du plutonium militaire, le gouvernement belge ne fournira

aucune réponse à la proposition du gouvernement US de discuter du traitement éventuel à BN de plutonium américain.

L'horizon commence à s'éclaircir pour le nucléaire en 2003 avec l'extension de la durée de vie des centrales jusqu'à 60 ans aux USA et la commande d'une unité de 1600 MW par la Finlande, mais cette éclaircie ne concerne pas BN. Au contraire, comme la France maintient le recyclage du plutonium et se rend autonome en décidant de porter la capacité de Melox à 145 t/an et de demander une extension de capacité à 195 t/an, le futur de BN au-delà de 2006 est de plus en plus compromis. De plus, la France obtiendra des américains la fabrication à l'usine MOX de Cadarache des 4 assemblages de démonstration nécessaires pour accélérer leur programme d'élimination du plutonium militaire : cette usine sera fermée juste après cette fabrication.

La signature en 2001 d'un accord de collaboration avec les Britanniques qui peinent à démarrer leur propre usine de 120 t/an, SMP sur le site de Sellafield, ne résout pas le problème de la charge future de BN.

Les clients potentiels de BN, de facto réduits à deux – Cogema et BNFL – par l'effet de la concentration de l'industrie, ont décidé en 2005 de ne plus passer de commandes à réaliser dans l'usine de Dessel. Dans ces conditions, le futur de l'usine était mis en question et la fermeture devait être envisagée : la première phase de concertation prévue par la loi Renault a démarré en novembre 2005.

Le 22 décembre 2005, le conseil d'administration de BN a pris acte du constat par le conseil d'entreprise du siège de Dessel que la phase de concertation avait été respectée et achevée, le Conseil a alors décidé la fermeture de l'usine et de son démantèlement à la fin de la dernière campagne de fabrication. Trente personnes resteront cependant employées pour assurer le gardiennage et la sécurité de l'usine pendant la période d'attente du démantèlement et pendant le démantèlement proprement dit des installations.

Dans ces conditions, la dernière fabrication s'est achevée dans l'usine de BN dans le courant de l'été 2006. Au bilan de BN : 657 t de MOX produites soit l'équivalent énergétique de 66 millions de tonnes de pétrole c'est-à-dire de l'ordre d'un millier de supertankers de la taille du Prestige. De plus, l'utilisation de ce MOX a évité l'émission de CO_2, il a donné de l'emploi à 250 personnes pendant 20 ans, avec une sûreté et un respect de l'environnement caractérisés par une amélioration continue des indicateurs et l'absence d'incident significatif, une qualité irréprochable et des clients satisfaits. Cette production a donné un chiffre d'affaires annuel de 50 à 70 Meuros, de façon parfaitement rentable ce qui a permis de constituer les provisions qui permettent aujourd'hui à BN de faire face à ses engagements de cessation d'activité. Il faut enfin rappeler que cette

fabrication s'est toujours faite dans le respect le plus strict des engagements internationaux de notre pays en matière de non-prolifération des armes nucléaires.

La fabrication MOX est terminée, le démantèlement va commencer : c'est une autre et nouvelle histoire qui commence.

Figure 1 : L'usine BN de fabrication de MOX de Dessel

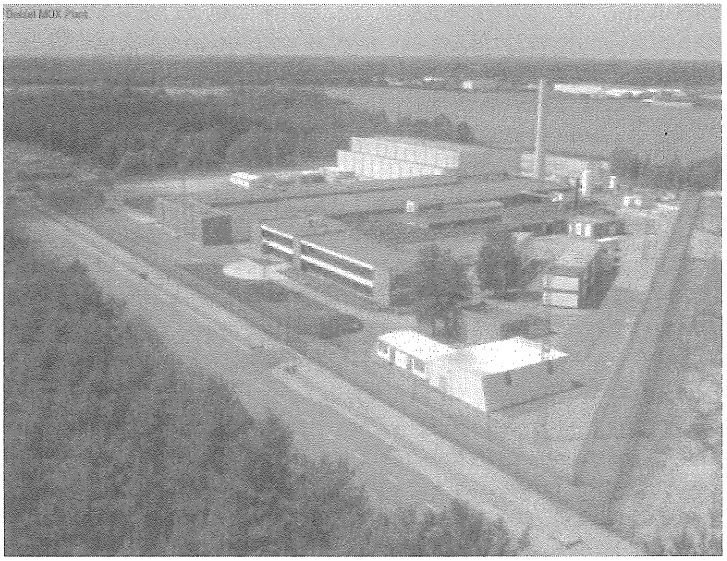
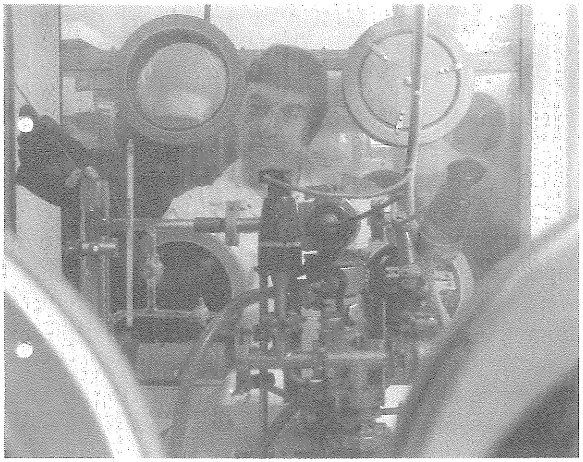


Figure 2 : Boîte à gants



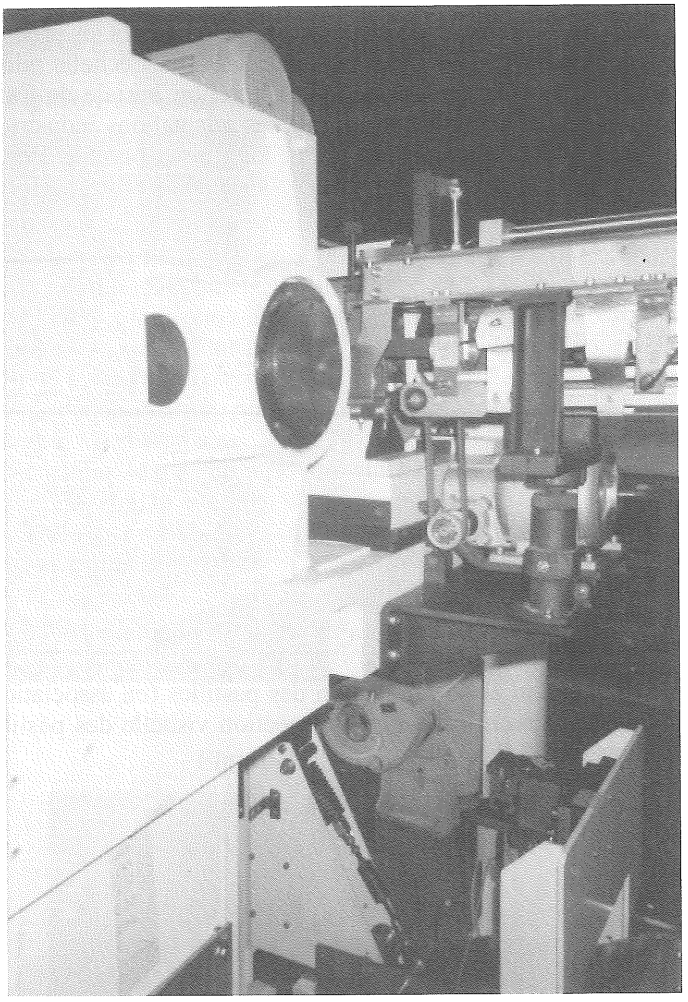
III. Ingénierie des usines MOX

Le fait d'avoir construit, exploité et mis à niveau sa propre usine a permis au bureau d'études de BN d'acquérir une compétence incontestable en matière d'ingénierie d'usines MOX. Acquise dès les premiers pas de cette technique pratiquée dans les années 1960 à l'échelle pilote, elle s'est largement développée lors de la construction initiale de l'usine au début des années 1970 et surtout lors de ses adaptations industrielles de 1982 à 1985 et de 1994 à 1999. Tout au long de la période 1986-2006, l'ingénierie a assuré un suivi permanent pour améliorer les performances et la qualité de cette production.

Suite aux accords avec Cogema dont nous avons parlé plus haut, une coopération s'organise aussi au niveau des techniques utilisées : transfert de compétences et support technique pour la conception, puis la mise en œuvre du procédé MIMAS dans la future usine Melox. Les équipes de BN sont intégrées à partir de 1987 dans le groupe chargé des études et de la construction mené par USSI/SGN. L'usine qui sera construite à Marcoule aura une capacité initiale de 100 t/an et sera nettement plus automatisée mais également moins flexible que celle de Dessel, puisque destinée au départ à la seule production pour le compte d'EdF. Cette activité d'études se déroule essentiellement jusque 1992, date à laquelle le rapport de sécurité auquel participe BN est déposé auprès des autorités de sûreté françaises.

Pour le même projet, BN va fournir plusieurs équipements de production ou de contrôle : le système de contrôle des crayons (*rod scanning*), l'unité de granulation et de fabrication des pastilles (en association avec SICN), le poste de rectification et d'inspection visuelle des pastilles (en association avec GAME).

Figure 3 : Équipement de rectification fourni à MELOX en cours d'essai



En 1993, BN participe à la formation des ingénieurs et techniciens de production de Melox : l'usine de Dessel école au sein de ses équipes des cadres et des agents de maîtrise français. D'autre part, elle conseille Cogema pour l'adaptation de l'usine de Cadarache au procédé MIMAS.

C'est au cours de cette intense période de collaboration avec la France qu'est lancée l'étude (*conceptual and basic design*) de l'extension P1 de l'usine de Dessel, dont nous avons parlé précédemment.

De 1994 à 1999, ces équipes effectueront une importante campagne de modernisation de l'usine (voir plus haut). Mais c'est aussi le début de la participation de BN à la phase d'études industrielles de l'élimination du plutonium déclaré excédentaire à la suite du démantèlement des armes nucléaires. L'aspect politique de cette question est traité plus longuement dans le chapitre qui traite du désarmement et du plutonium. À partir de 1996, BN a proposé sa technologie tant aux USA (séminaire du 9 juillet à l'ambassade belge à Washington) qu'aux Russes (séminaire du 4 décembre organisé à la *Financial Academy* à Moscou). Mais dès janvier 1996 BN avait transmis en réponse à la demande du DOE du 5 décembre 1995, une « *expression of interest* ».

L'usine qui est proposée aux USA a une capacité de 70t/an. BN propose également d'effectuer la fabrication des assemblages destinés à la démonstration de leur fiabilité, les *Lead Test Assemblies*.

Côté Russie, BN participe à divers échanges dans le cadre notamment des accords passés avec la Commission européenne.

Il apparaît alors clairement que pour l'usine américaine, une association avec des sociétés basées aux USA est indispensable. BN entre dans un groupe formé par la filiale américaine de Cogema, Cogema Inc. avec le bureau d'ingénierie générale Stone & Webster et le producteur d'électricité Duke Power. Ce dernier dispose des réacteurs LWR dans lesquels les assemblages produits pourront être brûlés. Ce groupe reçoit la commande de l'étude conceptuelle le 22 mars 1999 pour un montant de 116 M$ dont 10M$ pour BN sur 3 à 5 ans.

C'est la même année que le Japon commence à s'intéresser à un transfert de technologie : le premier contrat porte sur l'expérience opérationnelle des presses à pastillage. Il sera suivi dès 2001 d'un transfert du procédé complet MIMAS en coopération avec Cogema vers le propriétaire – JNFL – et exploitant de la future usine J-MOX d'une capacité de 100 t/an.

À la même époque, BN effectue la formation d'ingénieurs russes de MINATOM. Elle vient également en aide à BNFL qui rencontre de sérieuses difficultés à la mise en service de l'usine MOX SMP associée à l'usine de retraitement THORP à Sellafield.

En 2005, COGEMA et BN décident de mettre fin à leur collaboration dans le domaine de la technique MOX et de l'échange des connaissances en la matière. Ceci a pour conséquence l'arrêt de leur collaboration dans la conception de l'usine MOX à construire par le DOE (département de l'Énergie) aux USA. Dorénavant elles reprennent leur liberté d'action

pour la vente de cette technique et des services d'ingénierie qui y sont associés.

En 2005 toujours, les travaux pour le Japon se sont poursuivis avec un contrat portant sur une mission d'assistance technique et de transfert de technologie relative au contrôle non destructif de crayons, pour la société NFI.

IV. Ingénierie combustible

Un troisième secteur d'activité de BN proche des deux précédents, est l'étude du comportement du combustible nucléaire sous irradiation. Cette activité avait permis dès les premières années de BN de développer des programmes de modélisation qui ont trouvé de nombreux utilisateurs dans le monde et ont bénéficié d'une mise à jour permanente. L'exemple le plus représentatif est sans doute le programme COMETHE qui modélise le comportement thermique et mécanique des crayons combustibles de tout type.

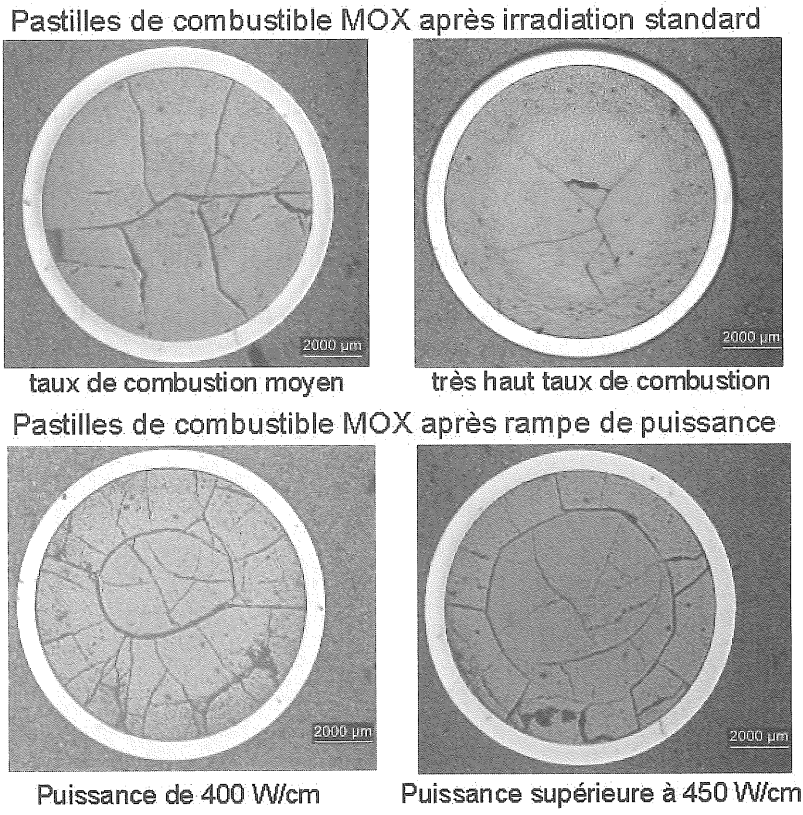
La conception du combustible (*fuel design*) et du cœur de réacteurs avait été une activité fort importante de BN jusqu'à la fin des années 1980, notamment avec le programme SNR-300, BR-3 et son extension Vulcain, la Centrale PWR des Ardennes, etc. L'évolution de l'industrie nucléaire a conduit à une concentration de ce type d'études entre les mains des fournisseurs de recharges (« *fuel vendors* ») dont BN était progressivement devenu un sous-traitant, renonçant dès lors aux études formelles de conception.

Par contre, l'activité d'évaluation du comportement des crayons combustibles sous irradiation est restée un point fort de la société. L'organisation de groupements de participants à ces programmes internationaux, lancés au début des années 1980, est devenue une spécialité de BN. Plus de 20 programmes ont été effectués au cours des 15 dernières années. Le nombre de participants pouvait varier de 3 ou 4 à 20 appartenant à plusieurs pays, parfois jusqu'à 9.

L'objet des programmes est essentiellement mais pas seulement le MOX. Les premiers concernent la validation neutronique des paramètres physiques en réacteur. Les mesures sont faites dans la maquette critique VENUS, au CEN/SCK. C'est la série de programmes baptisés VIP, Ariane et Rebus. Le comportement physico-chimique du MOX dans les PWR ou les BWR fait l'objet d'une autre série d'essais : ils traitent des performances à fort taux de combustion, du relâchement des gaz de fission, etc. Certains de ces programmes se basent sur l'examen post-irradiation de segments de barreaux irradiés dans les réacteurs de centrales nucléaires (tel que Gundremmingen ou Beznau), le taux de combustion pouvant être poussé jusqu'à 80 GWj/tM.

Durant la période 1990-2005, les clients principaux de BN pour ce qui est de la consultance en ce domaine ont été EDF en France, les électriciens et vendeurs de combustible européens et japonais, les autorités de sûreté, ainsi que la Commission européenne. Pour le premier, elle portait bien évidemment sur des questions liées à l'utilisation du MOX mais également sur des calculs des effets séismiques sur les cœurs PWR. Pour les autres, il s'agissait plutôt d'études sur des combustibles avancés, ou sur les hauts taux de combustion.

Figure 4 : Programme de R&D
microscopie optique sur combustible irradié



V. Ingénierie de traitement des déchets nucléaires

Les années 1980 avaient vu un grand élan de BN en ce domaine vers l'Asie, plus particulièrement le Japon (avec la fourniture d'un incinérateur à haute température) et Taiwan (fourniture d'une installation de

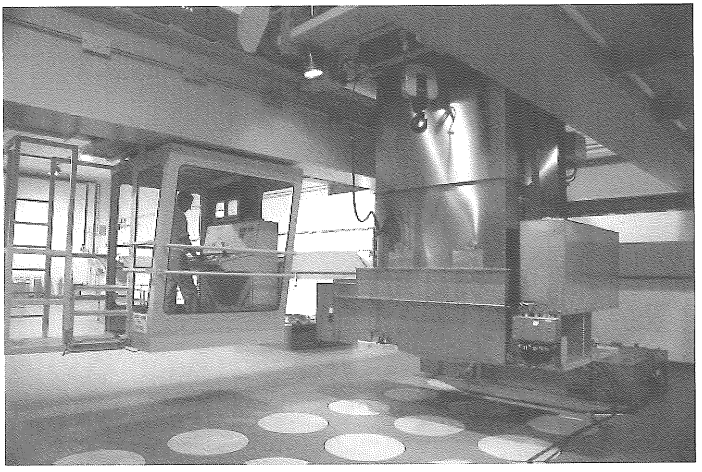
supercompaction). Malheureusement ce marché ne s'est pas confirmé dans les années 1990, et cette activité d'ingénierie s'est repliée sur l'Europe et même essentiellement sur la Belgique.

En Belgique, le client majeur est l'ONDRAF et son exploitant nucléaire, à savoir Belgoprocess. BN obtiendra au sein de BELGATOM, sa filiale commune avec Tractebel Engineering, la responsabilité de la conception et de la construction / mise en service de plusieurs installations sur ce site.

De 1989 à 1994, BN en collaboration avec Tractebel Engineering conçoit, construit et met en service pour ce client, l'installation CILVA. Elle est destinée au traitement centralisé de déchets de basse activité *low level waste* (LLW) et comprend notamment un supercompacteur et un incinérateur.

De 1990 à 1995, c'est le bâtiment 136 qui sert comme installation de stockage pour des déchets conditionnés de moyenne et haute activité. Les conteneurs dans lesquels les déchets sont enrobés dans du verre, y sont empilés par neuf dans des colonnes refroidies à l'air en permanence. Ils y resteront de l'ordre de 50 ans avant d'être selon les objectifs actuels, descendus dans l'entreposage géologique dans le sous-sol du site de CEN/SC K.

Figure 5 : Bâtiment 136 pour le stockage des déchets vitrifiés à Belgoprocess. Salle de chargement des *canisters* de déchets



Ensuite, de 1998 à 2004, BN effectuera les mêmes tâches pour le bâtiment 110, qui comprend l'installation de triage et de conditionnement de déchets alpha et pour le bâtiment 155 qui est destiné au stockage des déchets alpha de basse activité.

Avec Tractebel comme client, BN a étudié et suivi (1996-2002) la construction de l'installation HRA sur le site 2 de Belgoprocess. Il s'agissait du conditionnement sur le site même de déchets de haute et moyenne activité entreposés sur ce site.

On constate que la plupart de ces contrats ont été des entreprises de longue haleine. Mais en dehors de ces réalisations très concrètes et très complètes, l'ingénierie a effectué de nombreuses études pour le compte de tiers que ce soit encore pour l'ONDRAF ou pour la Commission européenne, l'EDF ou Tractebel et Synatom. Il serait sans doute fastidieux d'aligner ici les intitulés de tous ces travaux. Epinglons parmi eux les études résultant de la position de l'État belge renonçant au retraitement des combustibles usés en 1998, études du conditionnement et des moyens d'entreposage de ces matières dans le cas de ce qu'on appelle un cycle ouvert. Dans un domaine proche, mentionnons l'étude de scénarios alternatifs pour la conception des barrières dans le stockage des déchets de catégories B et C dans l'Argile de Boom (site de Mol).

L'ingénierie de BN a également participé à de nombreux projets en support à sa filiale TRANSNUBEL dans le domaine des emballages de transport ou de stockage, notamment de combustible irradié.

Figure 6 : Bâtiment 155 pour le stockage des déchets alpha à Belgoprocess – Sas d'entrée des fûts de déchets



Transnubel
Le transport des matières radioactives et nucléaires

Jean VAN VLIET, Alain MICHEL et Serge HÉRIN

Directeur général de Belgonucleaire
Consultant
Administrateur délégué de Transnubel

I. Introduction

Transnubel (TNB) a été créé par Belgonucleaire (BN) en 1969, avec comme objectif de permettre le transport sûr de toute matière radioactive ou nucléaire. Le but initial était, bien sûr, d'assurer un support adéquat aux activités développées par sa société fondatrice. Les actionnaires originaux de TNB étaient BN et des sociétés du groupe Transnucléaire, déjà bien établi internationalement dans le domaine du transport nucléaire. Grâce à l'appui de ses actionnaires et partenaires, TNB a pu très rapidement asseoir sa réputation internationale ; Il lui a donné accès non seulement aux marchés belges et internationaux mais aussi à des parcs d'emballages de transport, indispensables à ce genre d'activité. Aujourd'hui, BN est actionnaire à 75 % de la société et Transnucléaire International l'est à hauteur de 25 %.

II. Développement

Depuis son démarrage, TNB a acquis une reconnaissance internationale et est mêlée intimement en tous cas à une majorité des transports nucléaires impliquant le territoire belge. Elle participe activement aux évolutions de la réglementation en la matière, aux côtés des autorités compétentes belges, par sa collaboration avec l'Agence internationale pour l'énergie nucléaire à Vienne.

Dans les années 1970 et 1980, les activités de la société se sont développées dans le domaine du transport des déchets et de matières contami-

nées en Belgique, mais surtout du transport du plutonium et du combustible MOX, ceci en collaboration avec ses partenaires d'Outre-Quiévrain. C'est ainsi que TNB a participé activement au transport de plus de 180 t de combustible MOX fabriqué par BN vers les centrales françaises jusqu'en 1994 de même qu'au transport de plutonium vers BN.

La compétence de TNB dans le domaine du transport s'étend du transport de matières contaminées et de déchets à celui des matières fissiles (Pu et U) en passant par des échantillons, des crayons ou des assemblages irradiés. Par ailleurs, le développement d'emballages de transport de déchets ou de combustible a toujours fait partie des particularités de cette société. Au cours de son histoire, TNB a mis en place progressivement les structures et les moyens nécessaires pour faire face à ses obligations dans ce secteur. C'est ainsi, par exemple, que la société est la seule dans son domaine en Belgique à posséder un service de contrôle physique dirigé par un expert de classe 1 tel que défini par la réglementation belge.

Depuis 1991, Transnubel a pris en charge, sans interruption, en tout ou en partie, les transports de MOX vers les centrales allemandes, belges, suisses ou japonaises. Les assemblages de combustibles concernés sont réalisés à partir de crayons fabriqués par BN ou par Cogema, assemblés par FBFC à Dessel. Environ 300 transports d'assemblages ont ainsi été effectués jusqu'à présent vers des centrales nucléaires autres que françaises. Comme corollaires de ces transports d'assemblages, il faut également citer les transports d'oxyde de plutonium, de crayons MOX et d'échantillons pour analyse.

L'évolution de la réglementation et de l'environnement politique oblige les sociétés œuvrant dans le domaine des transports nucléaires à adapter en permanence leurs structures, modes de fonctionnement et outils. L'évolution au cours des années 1990, dont la montée en puissance des lobbies anti-nucléaires, a renforcé cette obligation pour TNB.

Le dernier contrat de retraitement de combustible belge a été « gelé » par le parlement en 1993 et la 4 décembre 1998, le gouvernement a confirmé ce moratoire pour l'avenir. Cette décision a transformé la politique d'Electrabel et a rapidement interrompu les transports de combustible usé vers l'usine de retraitement. D'abord suspendus pendant quelques mois en 1998 suite à des problèmes de contamination constatés lors de chargements de combustible usé (surtout en France, mais aussi dans une plus faible mesure en Belgique), ces transports ont repris en octobre 1998 à partir de la centrale de Doel. Le premier de ces « nouveaux » transports a d'ailleurs été perturbé par des manifestations d'opposants, activistes de Greenpeace, « *Voor Moeder Aarde* » et d'autres mouvements. Le dernier transport de combustible usé à partir d'une centrale nucléaire belge a eu lieu en 1999. Des transports ferroviaires ont cepen-

dant eu lieu depuis, au travers du territoire belge, en provenance de la centrale de Borssele aux Pays-Bas.

Ce qui était particulièrement visé était le retraitement et le recyclage du plutonium ; ceci explique d'autres accrochages avec les activistes des groupes de pressions anti-nucléaires, dont quelques exemples sont décrits ici.

En 1996, une campagne de transport de combustible MOX non irradié en provenance d'un réacteur de recherche, à destination de l'usine de retraitement de l'UKAEA à Dounreay, avait lieu par avion via l'aéroport d'Ostende. Lors du troisième transport de cette campagne, des membres de Greenpeace ont pénétré illégalement dans la zone de transit de l'aéroport et ont bloqué l'avion pendant un temps très limité. Il faut reconnaître que l'intervention des forces de l'ordre a été efficace. Ceci n'a pas empêché le pouvoir politique de l'époque de « demander » à TNB de ne plus effectuer ce type de transport jusqu'à ce qu'une enquête soit effectuée et même de féliciter Greenpeace pour avoir « mis un problème en évidence ». Cette enquête ne semble d'ailleurs jamais avoir eu lieu. Il faut insister sur le fait que la réglementation internationale de l'époque permettait ce type de transport sans aucune restriction et donc que ce transport était parfaitement licite. Transnubel possédait une autorisation de transport en bonne et due forme délivrée par les autorités compétentes belges, comme c'est le cas d'ailleurs, pour tous les transports effectués par la société.

Pour certains transports de combustible MOX, il a fallu régulièrement jouer au chat et à la souris avec les opposants, ceux-ci n'acceptant pas que la sécurité des transports nucléaires implique une certaine discrétion, sinon la confidentialité (imposée par la loi et les accords internationaux). Cette situation a d'ailleurs forcé TNB à s'expliquer devant la presse et à faire face à des recours en justice, recours qui n'ont en fait jamais abouti.

On pourrait citer de nombreux exemples de manifestations, en général non violentes, de la part d'opposants, comme des blocages de camions de transport de combustible irradié voire d'un train transport de ce type de matières aux Pays-Bas.

L'exemple le plus complet reste le premier transport de déchets vitrifiés en provenance de La Hague, résultant du retraitement de combustible irradié belge. Si Cogema avait la responsabilité contractuelle de ce transport envers son client Synatom, c'est Transnubel qui en assumait l'organisation et la réalisation en Belgique. Après de longues analyses sur le lieu où le transport ferroviaire venant de France devrait aboutir dans les environs de Belgoprocess à Dessel – le camp militaire de Geel ainsi que d'autres endroits avaient été envisagés – c'est en définitive la gare de Mol qui a été choisie car elle offrait les meilleures possibilités techniques, ce

qui est essentiel pour assurer la sécurité dans ce genre d'activité. Malgré une campagne d'information orchestrée par Synatom, le premier transport qui a eu lieu en mai 2000 a été fortement contesté, y compris en justice devant laquelle TNB se trouvait aux côtés de Synatom, de l'État belge et de Cogema. Quand le convoi est enfin arrivé en gare, les militants de Greenpeace et de « *Voor Moeder Aarde* » notamment, étaient présents pour s'opposer à son transfert, cherchant surtout à attirer l'attention de la presse. Une fois de plus, l'efficacité des forces de l'ordre et le soutien des autorités belges, malgré les tentatives des opposants et de certaines personnalités politiques, ont permis à ce transport, de même qu'à tous les suivants, de se dérouler finalement sans problème avec seulement un peu de retard. Il est à remarquer que ces problèmes avec les opposants en Belgique se sont complètement éteints dès que le Parlement belge, sous la pression du parti Ecolo, a voté en janvier 2003, la loi consacrant la sortie du nucléaire à terme.

Avec l'évolution de l'environnement politique des années 1990, et notamment les décisions allemande d'abord, belge ensuite d'arrêter à terme leur centrales nucléaires et de ne pas les remplacer, Transnubel a vu son marché évoluer également. Tout en maintenant ses activités centrées sur les transports nucléaires, les activités de services et d'ingénierie ont été développées.

Dans le domaine du transport proprement dit, l'amont du cycle a pris de plus en plus d'importance : UF^6 enrichi ou non, poudre UO_2, combustible UO_2 frais, etc. Par ailleurs, en relation avec les laboratoires de recherche, TNB, avec son emballage BG18 mis en service en 2002, est devenu un des acteurs européens essentiels pour le transport de crayons irradiés (UOX ou MOX) en vue d'examens post-irradiatoires. TNB a également assuré le transport pour stockage des éléments combustibles du BR3 placés dans des emballages CASTOR et le transport vers le stockage d'éléments de la cuve de ce réacteur en cours de démantèlement.

En ce qui concerne les activités de services et grâce à son expérience en matière d'emballages de transport, Transnubel fournit de plus en plus de prestations associées au transport ou au stockage de combustibles irradiés : aux exploitants de centrales nucléaires comme Electrabel (centrales de Doel et de Tihange dans le cadre de leur stockage sur site), centrale de Borssele et quelques centrales d'EDF (dans le cadre du chargement d'emballages de combustible irradié pour expédition vers le retraitement). Il est aussi courant que TNB soit appelé par les autorités compétentes belges pour intervenir lors de certains incidents : citons comme exemple la récupération en avril 1999 d'une source d'iridium volée et l'intervention dans le port d'Anvers pour récupérer des fûts d'uranium naturel qui, lors d'un transport maritime mouvementé et suite à un défaut d'arrimage, avait été endommagés, causant une contamination d'un

navire de transport de conteneurs. Cette intervention s'est faite avec succès en collaboration avec TECNUBEL.

En matière d'ingénierie et de fourniture d'équipement, les années 1990 ont vu se développer grandement les activités de la société en conception et fourniture. C'est ainsi que TNB a participé à la conception des emballages TN24 pour le stockage à sec à Doel et TN17T pour le transport sur site vers le stockage en piscine de la centrale de Tihange. De nombreux équipements auxiliaires au transport de combustible ont été fournis aux exploitants de centrales.

III. Conclusion

Au fil des années, et particulièrement entre 1990 et 2005, Transnubel a fait évoluer ses activités de manière importante. De société de transport qu'elle était au moment de sa fondation, elle est progressivement devenue une société de services associés au transport de matières nucléaires et radioactives. L'arrêt du retraitement a accéléré ce mouvement en amenant la société à développer de plus en plus ses activités vers l'amont du cycle et vers les services aux exploitants de centrales (ingénierie, fourniture d'équipement et prestations de service sur site dans le cadre de la gestion de combustible irradié). Ces services connaissent un développement constant en Europe, tenant compte de la volonté des exploitants de concentrer leurs propres efforts sur leur activité première et essentielle qu'est la production d'électricité.

Figure 1 : Photo P4262121 du transport de crayons irradiés de la centrale nucléaire de Goesgen (CH) au moyen de l'emballage BG 18. Arrivée de l'emballage chargé à PSI (CH) pour déchargement en cellule chaude

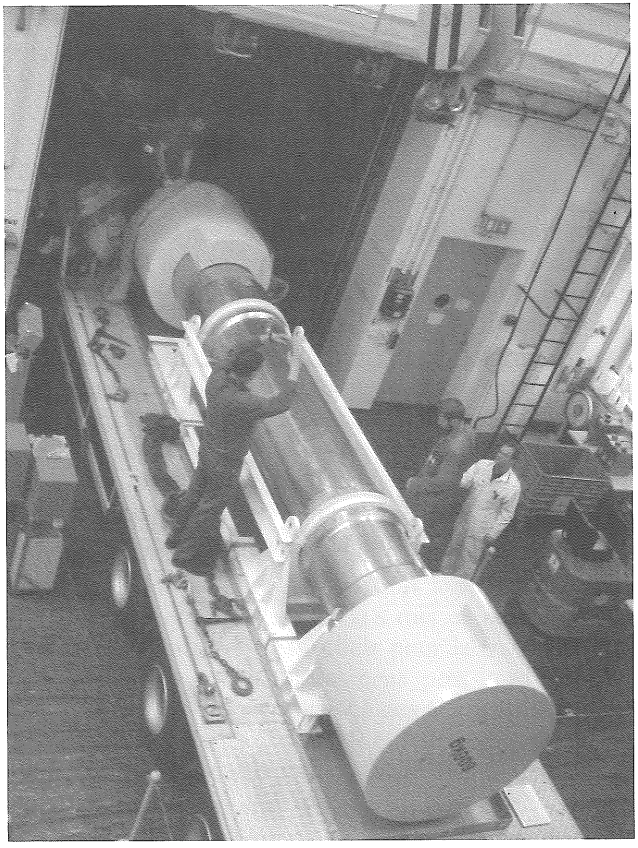
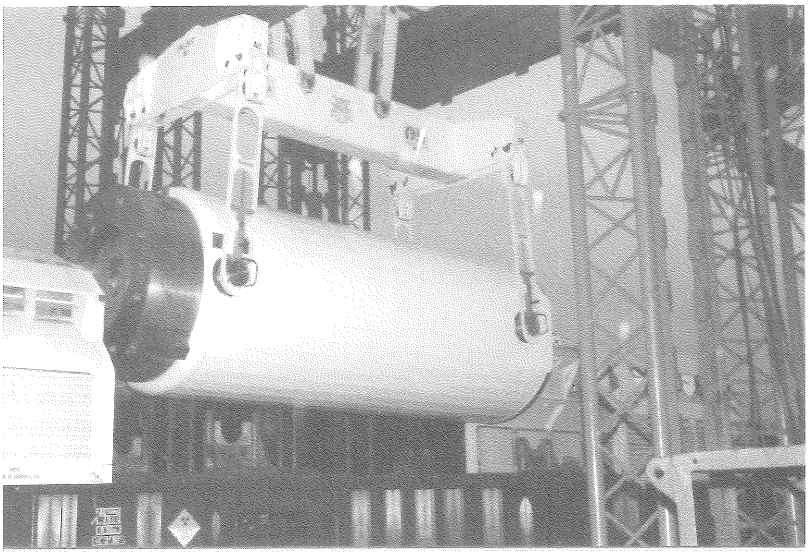


Figure 2 : Photo TN 28 du transport de *canisters* de résidus vitrifiés de La Hague vers Dessel Transbordement de l'emballage TN 28 du wagon ferroviaire vers remorque routière en gare de Mol au moyen du Sarlift



IBA
Le nucléaire au service de la vie

Yves JONGEN

IBA Managing Director and Chief Research Officer

I. Introduction

L'utilisation de radiations ionisantes est de plus en plus présente dans les domaines de la santé et du bien-être. IBA lui a donné une forte impulsion en créant une série de cyclotrons de nouvelle génération capables de produire, dans des conditions optimales, les médicaments de diagnostic dont l'industrie radiopharmaceutique et les hôpitaux ont besoin.

IBA a également fait progresser la lutte contre le cancer en introduisant la protonthérapie dans les hôpitaux. La protonthérapie est un traitement médical par irradiation de haute précision qui épargne les tissus sains. IBA appuie aussi l'essor de la brachythérapie, un traitement du cancer de la prostate par implants. Pour soutenir cette modalité, la société a créé un nouveau type de cyclotrons compacts capables de très hautes performances.

La panoplie des produits IBA compte par ailleurs une gamme d'accélérateurs d'électrons dont font partie les Rhodotrons©, émetteurs de rayons X de haute énergie. Leurs applications, particulièrement respectueuses de l'environnement, concernent un grand nombre d'activités humaines. Ainsi peut-on, grâce à l'ionisation, stériliser en masse les produits médicaux jetables, procéder à la décontamination de surfaces et à l'amélioration des propriétés de certains matériaux. Les applications concernent aussi les domaines liés à la sécurité. Aux USA, la neutralisation de l'anthrax est assurée au moyen d'un accélérateur IBA. Dans les zones de transit portuaires, les autorités étudient la mise en place de systèmes de radiographie équipés d'accélérateurs IBA. Ces systèmes détecteront non seulement les matières nucléaires mais aussi d'autres produits illicites qui auraient été dissimulés dans les conteneurs.

Enfin, une part significative des ressources d'IBA est consacrée à la recherche de nouvelles solutions et à leur développement.

II. La création d'IBA

IBA fut créée en 1986 par Yves Jongen qui fut rejoint progressivement par plusieurs membres de l'équipe scientifique du CRC (Centre de recherches du cyclotron) de l'Université catholique de Louvain (UCL) qui bénéficiaient d'une expérience en physique nucléaire remontant aux générations actives dans les années 1930.

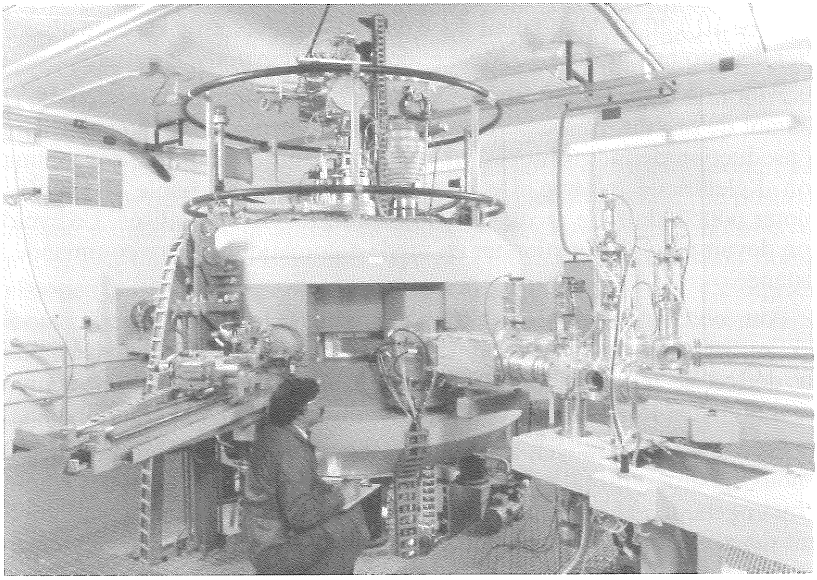
Dès 1939, les physiciens de l'UCL, à la suite de leurs homologues de l'Université de Berkeley (Californie) étaient prêts à construire le premier cyclotron européen. La guerre interrompit leur projet. Ils le reprirent en 1947 et construisirent un cyclotron de 3,5 MeV (3,5 millions d'électrons volts) dans un bâtiment situé près de Louvain.

En 1970, à l'occasion du transfert de l'UCL de Louvain à Louvain-la-Neuve, l'université s'équipa d'un des plus puissants cyclotrons d'Europe à l'époque. Cette machine de 90 MeV sert toujours à la recherche fondamentale en physique nucléaire et à l'étude de nouvelles applications médicales. C'est cet aspect médical qui va orienter IBA sur les terrains du diagnostic par imagerie fonctionnelle et sur ceux de la thérapie du cancer.

Alors que, dès le début des années 1980, la demande de l'industrie pharmaceutique en radioisotopes produits à l'aide de cyclotrons augmentait sans cesse, l'offre des fabricants était insatisfaisante. C'est ce qui poussa Yves Jongen – à l'époque codirecteur du CRC – et son équipe, à dessiner un cyclotron de nouvelle génération. Lorsque le prototype confirma les promesses du dessin, les spécialistes ne purent que constater que ce nouveau cyclotron, baptisé Cyclone 30, constituait un véritable bond technologique. Il dépassait ce que l'industrie attendait. Du jour au lendemain, les cyclotrons concurrents appartinrent au passé.

A. Le Cyclone 30

Figure 1 : Photo d'un Cyclone 30 sur site



La création de ce cyclotron a été l'évènement fondateur de la société IBA.

Dès 1987, Yves Jongen s'était adjoint les talents d'un très jeune ingénieur commercial appelé Pierre Mottet. Ensemble, renforcés par une équipe triée sur le volet, ils allaient transformer IBA, qui, bien que promise à un grand avenir, n'était encore qu'une spin-off de laboratoire, en une société prospère, leader mondial sur ses marchés et cotée sur Euronext.

Le premier exemplaire de la série Cyclone 30 fut vendu en février 1988 à une grande société produisant des radiopharmaceutiques, l'américaine Médi+Physics. Elle appartenait à l'époque au groupe Laroche. Une percée aussi fulgurante secoua les marchés et très vite d'autres exemplaires furent vendus dans la foulée à des clients prestigieux au Japon, en Chine, en Australie et aux États-Unis.

Cyclone 30 fut par ailleurs une œuvre féconde dont les principes ont servi à la création d'une série d'autres accélérateurs de particules.

Qu'est-ce que ce nouveau cyclotron avait de si extraordinaire par rapport aux accélérateurs de particules de l'époque ?

Laissons la parole à Yves Jongen, son inventeur.

Un certain nombre de radioisotopes utilisés en médecine sont produits par des réactions nucléaires initiées par des faisceaux de protons ou, plus rarement, de deutons, d'une énergie de 30 MeV maximum. Par ailleurs, les radioisotopes émetteurs de positons ne requièrent que des énergies allant de 10 à 20 MeV. Il fallait donc dessiner un cyclotron capable d'accélérer des protons jusqu'à 30 MeV et dont l'énergie pouvait varier.

Pour intéresser les industriels, le nouveau cyclotron devait atteindre un courant de protons très supérieur à ce qu'on obtenait ailleurs et permettre la production de radioisotopes en grandes quantités pour une consommation d'électricité minime. De plus, la machine serait fiable et simple à piloter pour réduire le recours à une main-d'œuvre spécialisée. Le cyclotron devait pouvoir fonctionner en mode automatique et être commandé à distance.

Pour obtenir de tels gains de productivité, il fallait notamment modifier le dispositif d'extraction du faisceau. À l'époque, ce dispositif était un déflecteur électrostatique, élément fragile qui limitait le courant maximum que l'on pouvait extraire d'un cyclotron.

En cherchant le moyen d'extraire de très hautes intensités de faisceau, il nous apparut qu'il fallait accélérer non pas des protons mais des atomes d'hydrogène négatifs. Ceux-ci sont faits d'un proton autour duquel gravitent deux électrons. Un faisceau d'ions hydrogène chargés négativement est très facile à extraire. Il suffit en effet que le faisceau traverse une mince feuille de carbone pour arracher les deux électrons afin que les protons émergent, pratiquement à la même vitesse. Cependant un faisceau d'ions hydrogène chargés négativement ne peut être accéléré dans un cyclotron que si on y atteint un vide très poussé.

C'est dans le cadre de ces paramètres, qu'émergera le dessin d'un cyclotron révolutionnaire comparé aux cyclotrons du même type de l'époque. Lorsque le premier Cyclone 30 accéléra ses faisceaux, on constata que ses performances correspondaient à ce qui avait été calculé. Il produisait en effet cinq fois plus de faisceau (15 kW par rapport à 3 kW) et consommait trois fois moins d'électricité (90 kW par rapport à 300 kW) que les machines concurrentes. Il fonctionnait automatiquement et s'activait très peu, conclut Yves Jongen.

Vingt ans plus tard, le Cyclone 30 domine toujours son marché à 90 %. Premier cyclotron à avoir été conçu pour servir la médecine, il permet de produire, à échelle industrielle, beaucoup des radioisotopes utilisés en médecine nucléaire. Entièrement automatisé et piloté à partir d'un simple PC, sa fiabilité et sa haute productivité pour un faible coût énergétique, en ont fait un best seller mondial.

À l'heure actuelle, toujours sur la voie des solutions innovantes, IBA construit un nouveau cyclotron de haute énergie (70 MeV). La machine

fonctionnera à la clinique universitaire de Nantes, France et permettra la production d'une large gamme de radioisotopes qui serviront principalement à la recherche contre le cancer.

Dès son lancement, il était clair que les principes du Cyclone 30 pourraient se décliner sur d'autres types d'accélérateurs, notamment sur des accélérateurs plus petits dédiés à une technique très pointue du diagnostic par imagerie fonctionnelle : la Tomographie par émission de positons (TEP). En anglais : *Positron Emission Tomography* (PET).

Un émetteur de positons est un élément radioactif artificiel produit par cyclotron qui peut se stabiliser en émettant un électron positif : le positon. Presque immédiatement après son émission, le positon se combine avec un électron du milieu. L'annihilation de l'électron et du positon donne naissance à une paire de photons d'une énergie de 511 keV s'éloignant l'un de l'autre dans des directions opposées. Les paires de photons ainsi créées sont captées en « coïncidence » par les détecteurs du scanner TEP (Tomographe à Emission de Positons). Le traitement de l'ensemble des signaux permet la reconstruction d'images qui vont être utilisées dans un département de médecine nucléaire.

B. Les cyclotrons dédiés à la « Tomographie par émission de positons (TEP) »

À la fin des années 1970, la médecine nucléaire fit une importante percée en mettant au point cette nouvelle technique de diagnostic.

Les radioisotopes générés au moyen de cyclotrons sont localement incorporés dans des structures moléculaires qui intéressent le médecin. Ces synthèses sont réalisées dans les « radiopharmacies TEP ». Cette technologie présente plusieurs avantages, citons par exemple :

- la courte période des radioisotopes ;
- les radioisotopes produits sont constitutifs de la matière vivante, oxygène, azote, carbone.

La TEP offre un type d'examen à la fois précis et peu invasif. Aussi est-elle rapidement devenue la technique d'imagerie fonctionnelle préférée des spécialistes. On l'a d'ailleurs appelée "*Medicine's New Vision*".

Le traceur actuellement le plus utilisé au scanner TEP (PET-Scan) est le 2-[^{18}F]-fluoro-2-deoxy-D-glucose (^{18}FDG). Cet analogue du glucose, marqué au fluor 18, excelle dans la détection et la localisation de tumeurs cancéreuses, même de taille minuscule, qu'il différencie clairement des tissus sains.

La demande de plus en plus forte de 2-[^{18}F]-fluoro-2-deoxy-D-glucose (^{18}FDG) a constitué un tournant stratégique pour IBA. Très vite, la société a pris le leadership de ce nouveau marché, ouvrant des centres de

distribution sur 3 continents. De récents développements ont conduit ces centres à produire également d'autres produits, tels certains médicaments marqués au rubidium (Rb-82) ou à l'iode (I-124). En raison de la demande croissante couplée à la courte durée de vie active des produits (^{18}FDG : 109, 8 minutes de période), IBA renforce son réseau avec de nouveaux centres afin de pouvoir desservir un maximum d'hôpitaux.

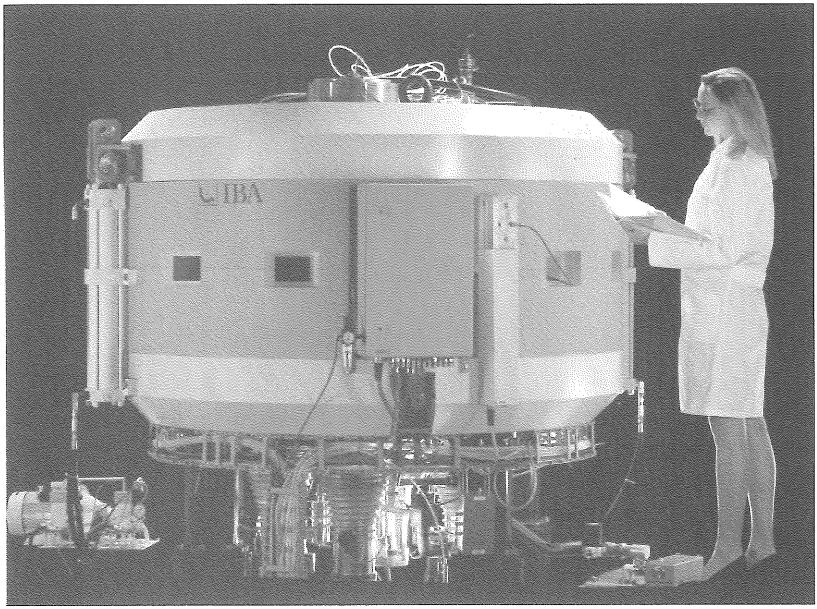
Permettant de localiser clairement les tumeurs, d'étudier le flux sanguin, d'explorer le fonctionnement des organes ou de mesurer l'évolution d'une maladie, la TEP contribue significativement à l'avancement de la médecine. Ainsi en neurologie, l'imagerie des fonctions cognitives aide à comprendre le fonctionnement du cerveau. Elle permet d'affiner la compréhension des maladies d'Alzheimer, de Parkinson et de l'épilepsie, donc d'en améliorer les traitements. Elle montre aussi, par exemple, les ravages des narcotiques et de l'alcool sur les cellules. Que ce soit en pédiatrie, cardiologie ou autres branches de la médecine, la TEP permet d'éviter, dans bien des cas, le recours à la chirurgie exploratoire.

Les médecins utilisent également l'imagerie TEP pour mesurer l'efficacité d'un traitement et contrôler les récurrences éventuelles.

Le Cyclone 30 était à peine lancé que les dessins de 3 cyclotrons TEP entraient dans leur phase de réalisation. En juin 1989, au cours d'un lunch organisé à l'occasion du congrès annuel de la *Society of Nuclear Medicine*, à Saint-Louis (Missouri), IBA présentait les principes de ses nouvelles machines TEP. L'assistance était composée de professionnels de la médecine nucléaire venus du monde entier. Aussi l'information se mit-elle à circuler rapidement : de nouveaux cyclotrons TEP, beaucoup plus performants, venaient de faire leur apparition.

Voici, brièvement présentée la gamme de cyclotrons TEP développés et vendus par IBA dans le monde.

Figure 2 : Photo d'un CYCLONE 18/9 sur site



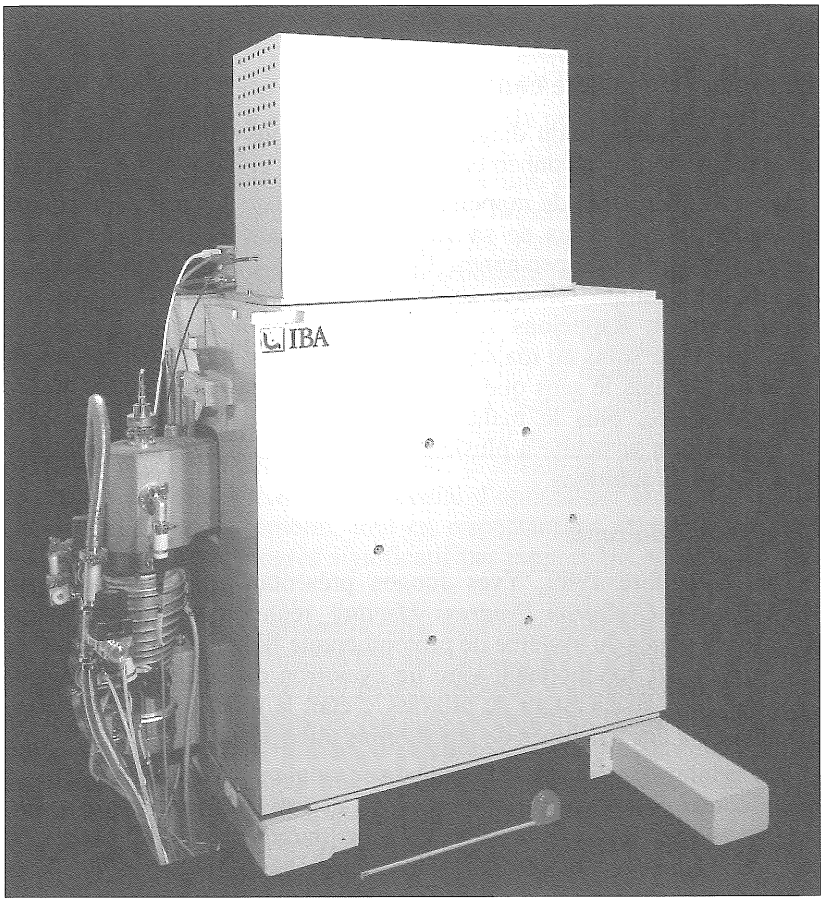
Conçu pour produire à grande échelle les radioisotopes TEP, son haut niveau de productivité et sa flexibilité en font la solution choisie par les centres de distribution, les grands hôpitaux et les institutions de recherche

Figure 3 : Photo d'un Cyclone 10/5 sur site



Bien que ce soit le modèle réduit du 18/9, ce cyclotron intègre les innovations des accélérateurs IBA et produit tous les radioisotopes TEP.

Figure 4 : Photo du Cyclone 3



Ce générateur d'Oxygène-15 est le plus petit cyclotron commercial connu. Il s'adresse aux hôpitaux spécialisés dans les examens nécessitant un flux continu d'oxygène-15.

C. Les Accessoires

Les cyclotrons fonctionnent avec un ensemble d'accessoires développés ou adaptés aux spécifications par les experts d'IBA. Il y a d'abord la source d'ions qui fournit les particules que le cyclotron doit accélérer. Ensuite vient le dispositif de transport qui canalise le faisceau sur la cible. Celle-ci contient le produit à irradier. Une fois le radioisotope produit il est automatiquement dirigé vers un appareil de synthèses chimiques. C'est dans ce module que les radionucléides sont incorporés, par couplage chimique, aux molécules du médicament porteur. Une fois cette

opération terminée, le personnel médical peut entrer en possession du produit radiopharmaceutique ainsi créé, l'injecter après avoir vérifié sa qualité et commencer l'examen à l'aide du scanner TEP.

III. Armes de pointe contre le cancer

Après la médecine du diagnostic, nous entrons dans celle des traitements du cancer par rayonnement.

Il est toujours utile de rappeler qu'une personne sur trois sera atteinte du cancer dans le cours de sa vie. En Belgique, le cancer tue chaque année plus de 40 000 personnes. En France, près de 200 000 nouveaux cas sont diagnostiqués chaque année et près d'un million de malades sont sous traitement. Rappelons aussi que dans plus d'un cas sur deux la combinaison de soins au malade devra inclure le recours à la radiothérapie. Il tombe sous le sens que plus la dose appliquée à la tumeur pourra être optimalisée, plus le malade aura des chances de guérison. Mais l'optimalisation se heurte à plusieurs problèmes auxquels la protonthérapie apporte des solutions.

A. La protonthérapie

Dès novembre 1989, Yves Jongen présentait aux participants du *26th European Cyclotron Progress Meeting*, réunis à Louvain-la-Neuve, les grandes lignes du système de protonthérapie IBA. D'un design parfaitement maîtrisé, fonctionnant avec un cyclotron de 235 MeV isochrone, d'énergie fixe, accélérateur de protons, c'était le premier système totalement dissocié des machines de laboratoires utilisées jusque là.

Les principes présentés à l'époque sont toujours d'actualité. Stable et fiable, conçu pour être fabriqué en série, le système peut fournir le faisceau de protons à plusieurs salles de soins durant plus de 20 heures par jour. C'est la protonthérapie pensée et calculée pour fonctionner en milieu hospitalier.

La protonthérapie est basée sur les propriétés balistiques du proton, noyau de l'atome d'hydrogène. Le proton se déplace suivant une trajectoire quasi linéaire. Dans le corps, sa dispersion latérale est très faible et il perd son énergie en un point déterminé. Ce point d'arrêt est fonction de l'énergie qui lui a été donnée et que l'on fait varier pour atteindre la tumeur. C'est au point d'arrêt que le proton, libérant la majeure partie de son énergie délivre une dose irradiante. Autrement dit, le proton a la propriété de ne pas blesser les tissus sains et organes critiques impliqués dans sa trajectoire. Le point d'arrêt du proton s'appelle le « Pic de Bragg » du nom du physicien anglais, Sir William Henry BRAGG, qui a pu établir, en 1904, la courbe de perte d'énergie des particules chargées dans la matière.

En raison de l'efficacité de la protonthérapie, les Américains l'appellent « *Bloodless Surgery* » (Chirurgie sans effusion de sang). Un exemple : l'élimination, aux protons, d'un cancer de l'œil, le mélanome de la choroïde, affiche un taux de réussie de 95 %, avec préservation de la vision. Le traitement alternatif le plus courant est l'énucléation.

La protonthérapie est le traitement de choix pour détruire les tumeurs malignes situées dans les zones d'organes critiques et radiosensibles comme la mœlle épinière, la vessie, le rectum, la prostate, etc. Elle est également recommandée pour traiter les tumeurs profondes, difficiles d'accès comme le cerveau ou non opérables. Dans les cas où l'obésité du patient complique le traitement, la protonthérapie peut être d'un grand secours.

Avec les techniques actuelles d'imagerie et de ciblage, les médecins peuvent dresser, pour chaque malade, un plan de traitement en trois dimensions où le volume de la tumeur est précisément délimité et localisé. Le diamètre du faisceau incident et la limite d'action des protons étant calculés, le médecin peut délimiter avec précision le volume à l'intérieur duquel les protons agiront. Cette faculté d'optimaliser la dose d'irradiation dans le volume tumoral, tout en respectant les structures environnantes, constitue un progrès significatif par rapport aux techniques classiques de radiothérapie.

Les avantages de la protonthérapie sont connus depuis longtemps. Ce qui a considérablement retardé son entrée dans les hôpitaux est dû au fait que le proton a besoin de très hautes énergies pour atteindre la tumeur. Ainsi pour pénétrer le corps de quelques centimètres, il faut au proton une énergie de l'ordre de 70 millions d'électronvolts (70 MeV). Pour atteindre avec précision des tumeurs très profondes, il faut une énergie de l'ordre de 235 MeV (+/- 30 cm de tissus).

Ces hautes énergies nécessitent des accélérateurs de particules puissants que l'on ne trouvait que dans les laboratoires de recherches, machines absolument pas adaptées aux besoins des hôpitaux.

C'est cette situation qui a motivé IBA à proposer des solutions qui permettent d'installer la protonthérapie dans un nombre croissant d'hôpitaux dans le monde.

Figure 5 : Principe d'un centre de protonthérapie IBA à 4 salles et 3 *gantries*



Ce centre fonctionne avec un cyclotron de 235 MeV distribuant le faisceau à 4 salles de traitement coordonnées. Équipé de portiques isocentriques, un tel centre hospitalier peut soigner plusieurs milliers de patients par an.

Dès l'automne 1991, IBA passait un accord avec SUMITOMO Heavy Industries afin de construire une installation de protonthérapie au *National Cancer Center* de Kashiwa.

Cependant ce qui allait mettre IBA sur orbite et en faire la référence mondiale des fabricants de systèmes de protonthérapie, fut le contrat que la société belge signa en 1994, avec le Massachussetts General Hospital (MGH) à Boston, MA.

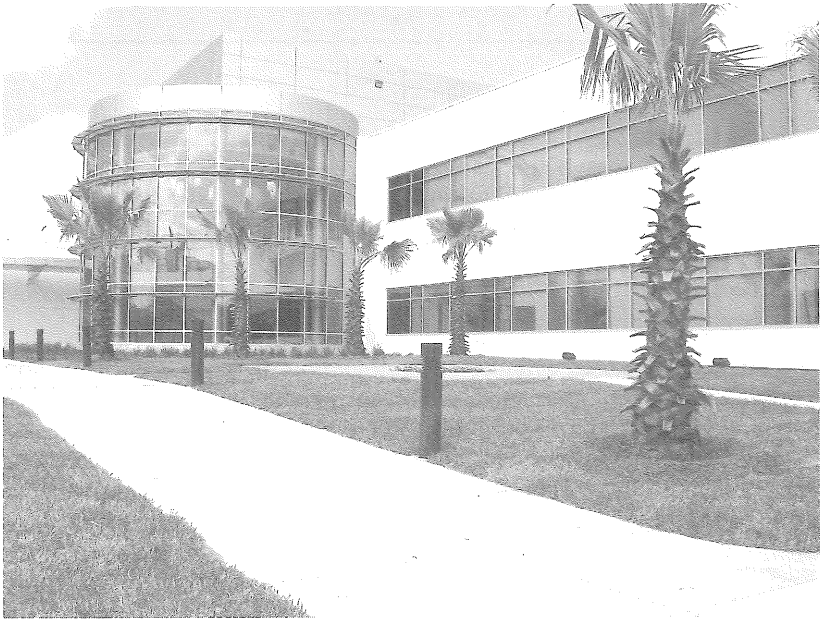
Le MGH est, depuis des décennies, l'institution phare dans le domaine de l'oncologie et de toutes les avancées contre le cancer. Au moment de la signature du contrat, c'était déjà l'hôpital qui bénéficiait de la plus longue expérience en matière de protonthérapie, ayant soigné, en 25 ans, plus de 6 000 patients avec un taux de succès atteignant, pour certaines indications, les 96 % ! Sa direction était donc composée des meilleurs experts dans le domaine. Ayant décidé de passer à la vitesse supérieure et de soigner plus d'un millier de patients par an, ils voulaient créer un nouveau centre de protonthérapie équipé des instruments les plus modernes.

IBA et ses partenaires se trouvèrent confrontés à des géants de l'industrie comme Siemens, General Electric et Grumman Aerospace.

Au terme d'une compétition féroce, ce fut IBA qui l'emporta et qui équipa le nouveau centre qui, plus que jamais, est la référence mondiale en protonthérapie.

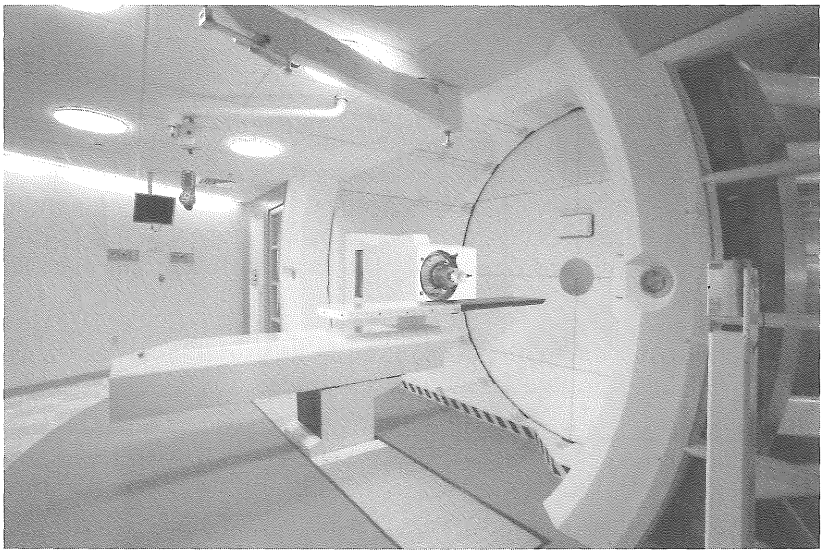
Depuis, IBA a multiplié les contrats de fourniture et d'installation d'équipements avec de grandes cliniques aux USA, en Chine, en Corée, en Allemagne, en France, etc. Dans l'univers de la cancérologie, l'intérêt envers le proton ne cesse de croître. Comme les études montrent qu'un centre de protonthérapie ne peut répondre qu'aux besoins d'une population d'environ 10 millions de personnes, la création de tels centres ne fait que commencer.

Figure 6 : Photo du nouveau centre de protonthérapie de Jacksonville, Floride



Les projets de création de centres de protonthérapie se multiplient dans le monde.

Figure 7 : Photo d'une salle de traitement avec *gantry*
Simulation d'un traitement



La tête rotative et le système de positionnement donnent au médecin la liberté d'administrer le faisceau de protons selon l'angle d'incidence le plus favorable suivant les étapes successives du plan de traitement.

B. Pédiatrie

Le néoplasme du système nerveux central est la tumeur du cerveau la plus fréquente chez les enfants. La combinaison de soins inclut la protonthérapie qui souvent joue un rôle crucial. Liée aux progrès de l'imagerie qui améliore le ciblage, la protonthérapie permet d'irradier la tumeur avec précision tout en optimalisant les doses curatives. Cela augmente les chances de réussite et réduit les risques de séquelles causées par le traitement. Autre indication relevant de la pédiatrie : le sarcome d'Ewing, un cancer de l'os observé le plus souvent chez les enfants de 10 à 15 ans. C'est un cancer dangereux qui gagne précocement d'autres régions du corps. Son traitement optimal associe protonthérapie et chimiothérapie.

C. La hadronthérapie

La recherche contre le cancer ne s'arrête jamais. Le département Recherche & Développement d'IBA propose depuis 2005, un système de thérapie du cancer par faisceaux d'ions carbone fonctionnant avec un accélérateur de 400 MeV. L'hadronthérapie permet de contrôler notamment

les tumeurs radio-résistantes à géométrie complexe. Le traitement complet est généralement réparti sur un nombre réduit de séances.

D. La neutronthérapie

Les potentialités du neutron dans le traitement du cancer ont été étudiées et appliquées dès la fin des années 1980 par des équipes médicales de l'UCL, avec l'appui de chercheurs d'IBA. En 1991, IBA avait d'ailleurs passé un contrat de collaboration avec des chercheurs américains du HARPER HOSPITAL de Détroit (MI) dans le cadre du développement d'un cyclotron supraconducteur fixé sur portique isocentrique pouvant effectuer des rotations complètes autour du patient.

En juin 2005, IBA a signé un contrat avec une société médicale japonaise pour la fourniture d'un système de production de neutrons épithermiques pour la thérapie par capture de neutrons sur le Bore (BNCT). Le système construit par IBA utilise un faisceau de protons de très haut courant (20 mA), mais de faible énergie (2.8 MeV), produit par un accélérateur de type « Dynamitron ». Des neutrons de faible énergie sont produits en bombardant une cible de lithium par les protons. Le spectre des neutrons est ensuite optimisé par un filtre, utilisant comme modérateur du MgF_2. En irradiant des cellules cancéreuses dans lesquelles on a amené du bore par une molécule appropriée, les neutrons épithermiques provoquent des réactions nucléaires qui détruisent les cellules malignes tout en préservant les cellules saines voisines, dont la concentration en bore est plus faible.

E. Le marquage des tumeurs

Les travaux visant à augmenter sans cesse la précision et l'efficacité des traitements se poursuivent. Pour éviter que les mouvements d'organes, même léger, dans le corps, ne déplacent la tumeur et n'altèrent ainsi la précision du traitement, IBA a créé un marqueur non radioactif fait d'un fil d'or fin qui est implanté une fois pour toutes dans la tumeur. Conçu pour rester stable dans les tissus, le fil d'or, immédiatement repéré par imagerie, permet de déterminer la localisation exacte de la tumeur avant chaque séance de traitement.

F. La brachythérapie

À lui seul, le cancer de la prostate frappe chaque année des millions d'individus dans le monde. Une modalité de traitement habituelle est la résection chirurgicale de la prostate. Mais celle-ci occasionne fréquemment des séquelles handicapantes telles que l'impuissance sexuelle et l'incontinence. Cette situation a poussé les chercheurs à trouver des solutions de rechange moins radicales mais aussi efficaces. L'une d'elles

est la brachythérapie. Cette modalité de traitement consiste à implanter dans la tumeur des sources scellées dont la radioactivité, limitée dans le temps, détruit les cellules malades.

IBA était entré dans la technique de la brachythérapie en 1992, lorsque les dirigeants d'une entreprise d'Atlanta, inventeurs d'un nouvel implant marqué au ^{103}Pd, la contactèrent. Leur implant rencontrait un succès croissant et ils demandaient à IBA de créer un cyclotron qui leur permettrait de mieux servir leur clientèle de médecins. En plus de la maîtrise industrielle qu'un cyclotron leur apporterait, il leur offrirait l'avantage de produire le palladium à partir du rhodium, un métal peu onéreux. Mais cela n'avait jamais été fait. Jusque là, le ^{103}Pd n'était produit que par réacteur nucléaire. Cependant, les inventeurs d'Atlanta s'obstinaient. Ils ne voulaient plus se fournir via les réacteurs car les conditions de prix et de livraison qu'on leur imposait étaient démotivantes.

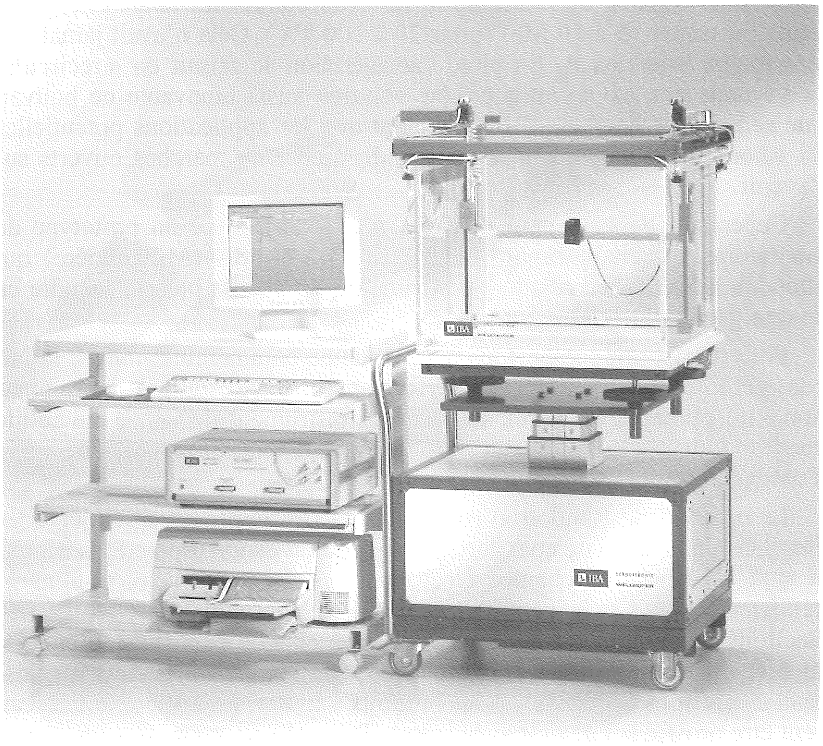
IBA se mit donc à la tâche et, réussissant à repousser les limites de la technologie des accélérateurs, parvint à construire, en moins d'un an, une machine dont l'intensité du faisceau était jusqu'à 5 fois supérieure à celle des cyclotrons standards. Ce premier cyclotron, dédié à la production du Pd-103, fut suivi de beaucoup d'autres.

IV. La dosimétrie

Cette discipline est née à la fin du 19e siècle, peu de temps après l'apparition du radiodiagnostic et de la radiothérapie. Car très vite, les premiers médecins qui utilisèrent ces nouvelles techniques, comprirent la nécessité de caractériser la quantité et la qualité du rayonnement utilisé. Dès 1908, le physicien Paul Villard construisait la première chambre d'ionisation qui reste aujourd'hui l'appareil de référence pour mesurer les rayons ionisants.

La dosimétrie s'est développée et perfectionnée parallèlement aux progrès de la médecine nucléaire et de la radiothérapie. Elle relève du principe de l'assurance qualité qui lie chaque hôpital à ses malades. Depuis 1999, IBA est leader de ce marché fournissant plus de 2 500 hôpitaux dans le monde. Les appareils servent tant l'imagerie médicale que la radiothérapie, quel que soit le type d'accélérateur utilisé. La gamme comprend les équipements pour l'analyse des champs de rayonnement, la dosimétrie *in vivo*, la dosimétrie absolue et la dosimétrie utilisée pour l'IMRT (Radiothérapie par modulation d'intensité). Elle inclut bien entendu les équipements qui valident l'assurance qualité.

Figure 8 : Photo du Fantôme Bleu de Wellhöfer « Blue Phantom »



Cet appareil caractérise le tracé du faisceau d'un accélérateur linéaire utilisé en radiothérapie.

V. Ouverture sur l'avenir

Afin que ses programmes de recherche soient en phase avec les demandes de l'industrie et anticipent correctement les attentes des marchés, IBA a formé en juin 2005 un Conseil consultatif médical. Son objet est de servir d'éclaireur et de lien entre la communauté de recherche biomédicale et IBA. Ce Conseil participe activement à la planification et au développement d'initiatives nouvelles et fait des recommandations d'orientation.

C'est en 1991 que des dirigeants du CEA-LETI entrèrent en pourparlers avec IBA en vue de l'industrialisation et de la commercialisation du Rhodotron©, une de leurs inventions.

Le CEA-LETI est la division « Technologie avancée » du Commissariat à l'énergie atomique de France chargée des transferts à l'industrie.

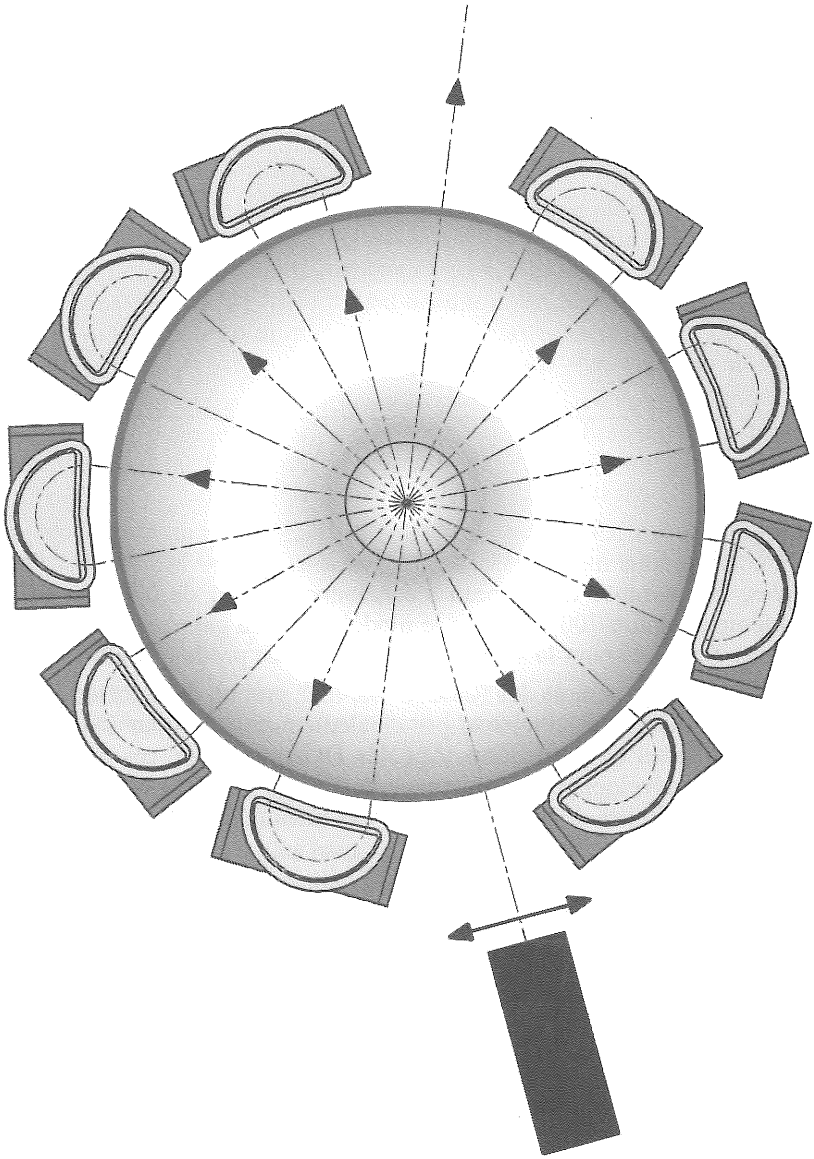
Là encore, il s'agissait d'un appareil de nouvelle génération. Le CEA avait réussi la quadrature du cercle, c'est à dire inventer un accélérateur d'électrons capable de produire un faisceau combinant haute énergie et haute puissance (5 à 10 MeV pour 20 à 100 kW). Cela n'avait jamais pu être réalisé auparavant. En plus, l'accélération se faisait en « recirculation » dans une cavité unique. Une solution aussi innovante ne pouvait que séduire les équipes d'IBA d'autant que les applications potentielles du Rhodotron s'adressaient à un grand nombre de marchés ouverts sur l'avenir.

Cependant l'accélérateur du CEA n'était encore qu'un prototype de laboratoire, un vilain canard de 3,3 MeV et 4 mA (Milliampère) qui attendait à Saclay, en région parisienne, qu'on veuille bien le prendre en charge.

Pour transformer ce prototype en machine commercialisable, il fallait considérablement améliorer ses performances, son design, sa consommation, son pilotage, etc. Bref, en faire un instrument de haute rentabilité que les industriels de la stérilisation et de l'ionisation auraient envie d'acheter.

Le principe du Rhodotron est d'une grande simplicité. On injecte les électrons dans la cavité coaxiale au moyen d'un canon d'électrons. Ceux-ci sont accélérés par champs électriques en direction d'électro-aimants déflecteurs situés à la périphérie extérieure. Ces aimants renvoient les électrons dans la cavité qui leur impulse à chaque passage une énergie supplémentaire de 1 MeV. Lorsque l'énergie voulue est atteinte, le faisceau d'électrons est dirigé sur les produits à traiter. En option, le faisceau peut être projeté sur une cible de métal (Tungstène, tantale ou autre), avec laquelle, par freinage (Bremsstrahlung), il produira des flux de rayons X dont la puissance de pénétration est élevée.

Figure 9 : Camembert montrant le principe de fonctionnement du Rhodotron



Avec cavité coaxiale, aimants déflecteurs, canon d'électrons et extraction du faisceau.

En octobre 1993, le premier objectif était atteint. La machine en construction réussissait à accélérer un faisceau de 1 Mev à 20 mA et un faisceau de 10 MeV à 5 mA. Aucune perte de faisceau n'était enregistrée et 90 % de celui-ci était concentré dans un cercle de 10 mm de diamètre. On était sur la bonne voie.

Dès 1994, la première machine réussissait l'ensemble des tests techniques et les industriels commençaient à s'y intéresser. Si, par sa grande nouveauté, le Rhodotron faisait peur, il offrait en revanche une série d'avantages très supérieurs aux systèmes concurrents de l'époque.

Machine de faible encombrement par rapport à ses capacités, de design fonctionnel, automatisée, sa conversion énergétique est 4 à 5 fois supérieure à celle des systèmes concurrents. Comme le Rhodotron fonctionne très en dessous de ses limites, il peut travailler 24/24, traitant, avec précision, à cadence industrielle et avec flexibilité de dosage, un grand nombre de produits dans leur emballage final.

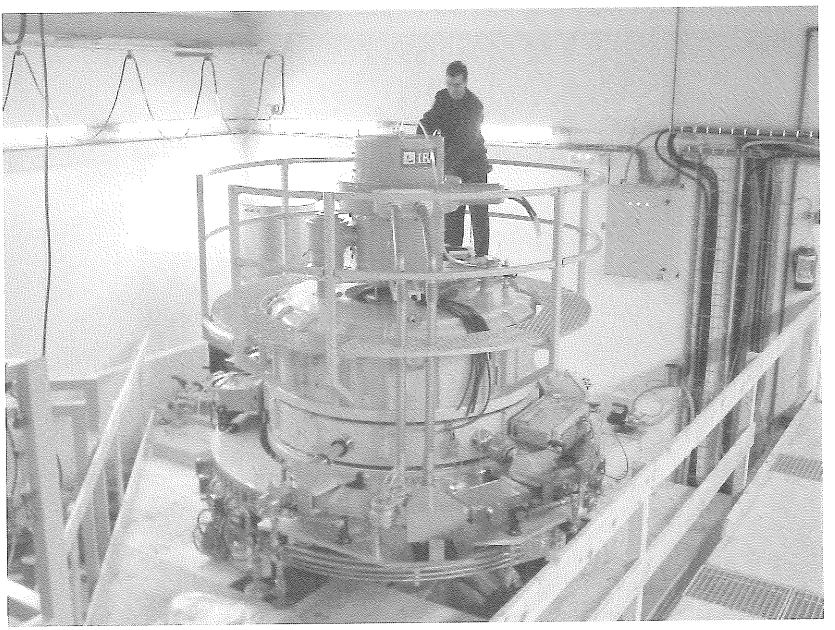
En 1995, le premier Rhodotron commençait sa carrière industrielle en Suisse dans ce qui était alors une des plus grandes entreprises d'ionisation d'Europe, devenue depuis la plus grande du monde. Beaucoup d'autres exemplaires allaient suivre et s'éparpiller sur 3 continents.

La gamme des Rhodotrons se décline actuellement sur cinq modèles dont l'énergie, tous modèles confondus, varie de 5 à 10 MeV. Selon les modèles, la puissance de faisceau s'échelonne à partir de 0,5 kW. Elle peut même atteindre 700 kW avec le modèle haut de gamme, producteur de rayons X utilisés pour la stérilisation en masse de produits médicaux.

En dehors de la gamme des Rhodotrons, IBA produit des accélérateurs d'électrons linéaires et compacts principalement conçus pour s'intégrer en bout de lignes de fabrication. Appelés Dynamitrons©, ces accélérateurs peuvent développer une puissance de l'ordre de 250 kW. Ils effectuent, dans les limites de leurs capacités, des travaux d'ionisation similaires à ceux des Rhodotrons.

IBA commercialise également un accélérateur d'électrons de faible énergie, spécialisé en décontamination de surface. L'appareil est utilisé par l'industrie pharmaceutique pour assurer le transfert stérile des produits en zone aseptisée.

Figure 10 : Photo d'un Rhodotron TT 1000 sur site



VI. Les marchés de l'ionisation

Les applications des faisceaux d'électrons et des rayons X sont nombreuses. Aussi n'en retiendrons-nous que quelques unes parmi les principales.

A. Le marché médical

Comme on l'a vu plus haut, les électrons peuvent aussi servir à assurer le transfert en continu de matériel stérilisé vers les zones de remplissage aseptique.

Figure 11 : Photo d'articles médicaux jetables



Stérilisés dans leur emballage d'expédition, ces articles représentent un volume à traiter qui se chiffre en millions de mètres cube par an.

À l'autre bout de la chaîne de soins, il y a les déchets pathogènes d'hôpitaux. S'ils sont décontaminés aux électrons, ils peuvent être éliminés comme déchets ordinaires. Le gain pour les utilisateurs et la collectivité est appréciable.

B. Le traitement des matériaux

Le traitement de polymères par des faisceaux d'électrons de haute énergie peut renforcer considérablement leurs propriétés mécaniques et thermiques en modifiant leur structure chimique. Après irradiation, le polytétrafluoroéthylène (PTFE), le polyéthylène, le polypropylène et l'oxyde de polyéthylène peuvent être utilisés comme additifs à d'autres polymères ou servir à améliorer les processus de fabrication.

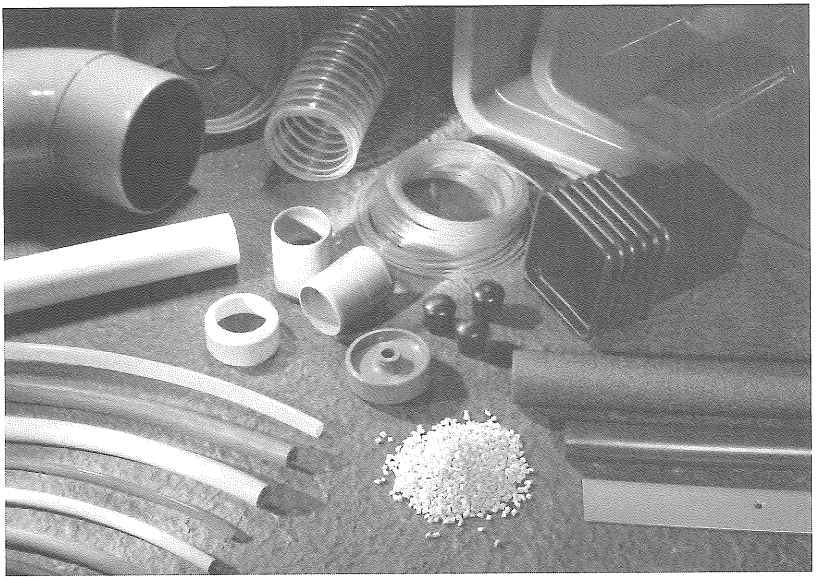
Des pièces façonnées ou usinées comme les joints, les tuyaux, les pneus seront irradiées durant ou après la fabrication pour améliorer certaines propriétés comme la résistance à la chaleur, la solidité, la rigidité et la dureté.

L'irradiation améliore la résistance au feu, tout en augmentant leur résistance mécanique.

Pour améliorer la vitesse de commutation de certains semi-conducteurs, on modifie leur structure cristalline par faisceaux d'électrons haute énergie. Les transistors bipolaires à porte isolée et les diodes à rétablissement rapide bénéficient de ce traitement.

La production de certains matériaux composites de haute performance destinés à l'aviation et à l'aérospatiale nécessite également l'exposition aux faisceaux d'électrons.

Figure 12 : Photo Câbles



Renforcement : le traitement aux électrons améliore la résistance au feu et aux tensions élevées tout en augmentant leur résistance mécanique.

C. Autres marchés

Les applications des faisceaux électrons et du rayon X s'étendent à bien d'autres domaines comme l'accélération du séchage des encres et la coloration de certaines catégories de pierres semi-précieuses. On pulvérise le téflon à l'aide d'électrons pour fabriquer l'anti-adhésif qui revêt les ustensiles de cuisine ou avant de l'ajouter aux lubrifiants de moteurs, etc. Les experts des industries pétrochimiques étudient des applications de faisceaux de particules au craquage d'hydrocarbures pétroliers lourds.

VII. Les domaines liés à la sécurité

A. Sécurité du courrier

Depuis novembre 2001, le *United States Postal Service* (USPS) fait passer le courrier destiné au congrès américain et aux services officiels, par le centre d'ionisation de Bridgeport dans le New Jersey, équipé d'un Rhodotron. Cette mesure fait suite aux attentats terroristes perpétrés au moyen de lettres dans lesquelles était glissé de l'anthrax.

La spore d'anthrax appartient aux catégories de pathogènes éliminés par les accélérateurs IBA. Il a donc suffi de déterminer la dose exacte à appliquer pour garantir la neutralisation de l'anthrax dans le courrier.

Le centre de Bridgeport fait fonctionner son Rhodotron jour et nuit. Il traite les tonnes de courrier que 200 camions de l'USPS viennent y déposer. Selon le volume des enveloppes et des colis, le courrier sera traité soit aux faisceaux d'électrons, soit aux rayons X. L'opération est rapide et les camions peuvent repartir avec un chargement proprement stérilisé.

B. Sûreté des conteneurs

En 2006, l'*American Science & Engineering Inc.* a chargé IBA de lui fournir un Rhodotron TT100 qui sera intégré à un système ultramoderne d'inspection des conteneurs. Conçu pour radiographier à grande vitesse les conteneurs qui franchissent les zones de transit portuaires, le système, actuellement en développement, détectera les produits illicites. Sont particulièrement visés les matériaux de numéro atomique élevé comme le tungstène, le plomb, l'uranium et le plutonium. D'autres substances de contrebande qui auraient été dissimulées dans les conteneurs, pourraient également être décelées. Le Rhodotron fonctionnera 24/24 h. Ses rayons X de haute énergie permettront même de repérer des éléments de taille réduite, soigneusement cachés. Une fois homologué, le nouveau système d'inspection devrait progressivement être installé dans tous les ports commerciaux américains.

C. Un grand marché potentiel : l'industrie alimentaire

Il arrive que des aliments contiennent des germes pathogènes, comme les salmonelles, l'escherichia coli et les trichines (Trichinella spiralis). Ces germes peuvent provoquer des intoxications graves, parfois mortelles. Aux États-Unis, on estime que l'intoxication alimentaire provoque chaque année 325 000 hospitalisations, 76 millions de gastro-entérites et 5 000 décès. Certains rapports officiels avancent des chiffres plus élevés. Enfants et vieillards sont les principales victimes de ces intoxications.

C'est pourquoi les autorités de nombreux pays, comme le ministère de la Santé publique aux USA (FDA), *le US Center for Disease Control and Prevention* (CDC) et l'Organisation mondiale de la santé (OMS) recommandent de manière officielle et pressante l'ionisation de certains aliments afin de les débarrasser des souches microbiennes. Sont visés les viandes, dont les viandes hachées pour hamburgers, et la volaille, les produits de la mer, notamment les crevettes, les produits frais ainsi que les fruits exotiques, les aromates, les épices et les assaisonnements. D'ailleurs dans nombre de pays, le traitement ionisant de certains de ces aliments est de pratique courante.

Les techniques d'ionisation des aliments ne datent pas d'hier. Les premiers brevets décrivant le recours à des procédés d'ionisation pour détruire les micro-organismes pathogènes dans les aliments remontent à 1905.

Le traitement ionisant consiste à soumettre les aliments aux rayons X d'énergie inférieure à 5 MeV ou aux faisceaux d'électrons d'énergie inférieure à 10 MeV ou encore à un rayonnement gamma issu du ^{60}Co. Dans ces conditions, les aliments ne subissent ni contamination radioactive, ni radioactivation. Leurs qualités organoleptiques, leur tenue et leur valeur nutritive restent intactes. Contrairement aux aliments non traités, les produits ionisés ne nécessitent plus d'adjuvant chimique pour prolonger leur conservation. L'ionisation suffit à retarder la germination et le dépérissement. À noter que l'alimentation que les astronautes emportent dans l'espace est ionisée. Il apparaît donc qu'une plus grande sécurité alimentaire passe par l'ionisation.

Le marché des céréaliers, notamment en zones subtropicales, devrait également s'ouvrir. Des millions de tonnes de céréales sont perdues chaque année à cause de la vermine. La désinfection partielle des récoltes se fait principalement par pulvérisation chimique. Celle-ci n'élimine ni les œufs ni les larves et dépose des résidus toxiques dont on retrouve des traces dans les aliments. La méthode moderne relève de la désinfection au moyen de faisceaux d'électrons.

D. L'écologie

Un autre grand terrain d'expansion est l'écologie. Les autorités prennent des mesures de protection de l'environnement de plus en plus strictes. Elles imposent, par exemple, le traitement de certaines eaux souillées, celui des fumées industrielles toxiques ou la dépollution des effluents d'égouts. Opérations qui peuvent se faire par faisceaux d'électrons.

Comme on peut le constater, nous sommes loin d'avoir exploré toutes les applications possibles des faisceaux électrons.

VIII. Projections sur le futur

A. Le projet Adonis

Le technecium-99m (^{99m}Tc) est un radioisotope très utilisé en médecine nucléaire. Il est livré sous forme de générateur molybdène-99 (^{99}Mo) dont la décroissance donne le ^{99m}Tc. L'approvisionnement futur de ^{99}Mo, générateur de ^{99m}Tc, pourrait subir de sérieuses défaillances entraînant des ruptures de livraison et des majorations de prix. En cause, le vieillissement des réacteurs nucléaires, qui en assurent la production à partir d'uranium 235 (^{235}U).

Au cours d'une conférence internationale sur les technologies de transmutation qui se tenait à Las Vegas en juillet 1994, Yves Jongen proposait de résoudre le problème en remplaçant le réacteur par un système activé par un cyclotron de 150 MeV. Dans ce système, un faisceau de protons de 225 kW, avec une intensité de courant de 1,5 mA, bombarde une cible de plomb qui va générer des neutrons de spallation (Émission d'un grand nombre de particules de haute énergie). Ralentis, ces neutrons frappent des cibles, faites d'^{235}U enrichi, formant un ensemble strictement sous-critique, et ceci pour obtenir un taux de fission maximum.

Les avantages de cette solution sont importants. Un seul système pourrait suffire pour couvrir la moitié de la demande mondiale. L'investissement de départ serait substantiellement inférieur à celui que nécessiterait la construction d'un nouveau réacteur. Les coûts opérationnels, ceux liés au traitement des déchets radioactifs ainsi que le coût du déclassement futur seraient nettement plus bas également. Très éloigné de la masse critique, activé par un cyclotron que l'on peut très rapidement arrêter, comme n'importe quel appareil électrique, le système serait aussi très sûr.

Cette solution, qui fut validée par le Centre d'étude de l'énergie nucléaire (SCK•CEN, Mol) est plus que jamais d'actualité. En effet, les réacteurs assurant la production de ^{99}Mo, considérés comme étant en fin de carrière lors de la décennie précédente, n'ont toujours pas été valablement remplacés. La question d'un approvisionnement satisfaisant de ^{99}Mo => ^{99m}Tc, dont les hôpitaux ont besoin, reste donc posée. D'autre part, les technologies associées à un tel projet ont progressé en dix ans. Par exemple, alors qu'une cible liquide de plomb-bismuth semblait nécessaire il y a dix ans, on sait aujourd'hui qu'une cible solide de tantale pourrait aussi fonctionner de façon satisfaisante, en étant plus simple, plus fiable et plus économique.

B. Le projet Myrrha

Dans la mythologie antique, Myrrha est la mère d'Adonis. Si Dieu lui prête vie, Adonis produira un jour des radioisotopes de médecine. En revanche, sa mère, Myrrha, pourrait contribuer à la solution d'un problème majeur, celui de l'élimination des déchets nucléaires de longue période et de haute activité.

Basée sur un principe technique proche d'Adonis, Myrrha est devenu un grand projet européen appelé Eurotrans. Une dizaine de pays y participent et la Belgique y joue un rôle important grâce notamment au Centre nucléaire de Mol. Le projet très ambitieux se réaliserait en plusieurs étapes, la première étant celle d'études simultanées sur, d'une part, un modèle de démonstration et d'autre part, une installation de type industriel principalement orientée sur la transmutation. Dans le projet Eurotrans, IBA participe aux études de la partie basse énergie de l'accélérateur linéaire.

Ces études actuellement en cours devraient déboucher en 2009 sur une décision européenne de financer la construction, à Mol, d'un premier système de démonstration. À plus lointaine échéance, une installation industrielle de transmutation pourrait s'ouvrir vers 2020. On estime qu'il faut une telle installation industrielle pour traiter les déchets de 7 centrales nucléaires.

S'il est construit, le système Myrrha sera un premier réacteur sous-critique de démonstration, activé par un linac, accélérateur linéaire de protons de 350 ou 600 MeV. Avec une intensité de courant de 5 mA, le faisceau provoquera l'émission d'un flux intense de neutrons par spallation en bombardant une cible primaire d'un mélange eutectique de plomb et de bismuth (Pb-Bi).

Un des buts de Myrrha sera de démontrer de façon macroscopique l'incinération des éléments les plus radio-toxiques des déchets nucléaires, et particulièrement des actinides.

Ce premier système Myrrha produira également des radioisotopes pour la médecine et l'industrie. Et il servira à la recherche qui portera, par exemple, sur de nouveaux types de combustibles nucléaires destinés aux réacteurs de nouvelle génération et aux réacteurs à fusion du futur.

IX. Conclusion

IBA a transformé, amélioré et rendu accessible au monde industriel et médical une série de concepts physiques qui jusqu'alors étaient cantonnés dans quelques laboratoires de pointe. Repoussant les limites de la technologie nucléaire, IBA a mis au service de la médecine et du bien-être des outils plus performants, correspondant mieux aux besoins des marchés

sur lesquels l'entreprise est active. Dans la lutte contre le cancer, IBA s'est placée à l'avant-garde avec des réalisations de pointe et des solutions novatrices. L'ensemble de ses activités, de même que l'orientation de ses recherches et de ses succès montrent que l'utilisation des radiations ionisantes est un facteur indispensable au progrès et au développement de nos sociétés dans un domaine aussi essentiel que la santé.

Tractebel Engineering

Ir. Jean VAN VYVE

Tractebel Engineering – Suez
Executive Vice-President Nuclear

I. Introduction

La fin des années 1980 avait été marquée, pour Tractebel Engineering, par l'abandon de la construction d'une 8e centrale nucléaire appelé projet « N8 », un projet qui représentait plusieurs millions d'heures de travail pour l'ingénierie. Il était dès lors impératif de réussir le virage du passage du métier d'architecte-ingénieur de centrales à celui de l'ingénierie du support à l'exploitation, entamé fort heureusement dès la mise en service des unités nucléaires belges dans divers domaines tels que la gestion des cœurs, la gestion des Révisions décennales, les améliorations de sûreté, les projets de simulateur full-scope.

Par ailleurs, il s'agissait également de saisir les opportunités qui s'offraient dans les pays de l'ancienne Union soviétique à travers les importants programmes financés par la Communauté européenne, et où Tractebel Engineering pouvait mettre en œuvre les savoir-faire acquis en Belgique. Belgatom fut le véhicule privilégié de ces projets.

En fait, et contrairement à ce que l'on a pu craindre lors de l'arrêt du projet N8, l'activité nucléaire de Tractebel Engineering a été soutenue durant les années 1990, grâce à plusieurs facteurs :

- La réalisation de grands projets de modification et de modernisation des centrales belges tels que les remplacements de générateurs de vapeur et les augmentations de puissance ;
- Le cycle des Révisions décennales ;
- Le succès de la participation aux projets financés par la CE et la BERD en Europe de l'Est.

Mais surtout, Tractebel Engineering a engagé une politique volontariste de développement des connaissances et de méthodologies d'études faisant usage de codes de calcul modernes dans de nombreux domaines,

tout en poursuivant activement la veille technologique dans le domaine des nouveaux produits et des nouveaux concepts de réacteurs, y compris via la participation à des programmes de R&D internationaux. Ainsi, Tractebel Engineering a pu s'approprier progressivement une grande part des études qui étaient précédemment réalisées par les chaudiéristes, tout en recherchant les meilleures solutions pour ses clients et en particulier Electrabel.

Grâce à tout ce savoir-faire, Tractebel Engineering a pu immédiatement se positionner sur les nouveaux projets de centrales qui ont vu le jour à partir de 2003-2004.

Les chapitres qui suivent illustrent les multiples développements et acquis technologiques de Tractebel Engineering, ainsi que les projets au cours desquels ils ont été mis en application. Tout ce travail permet à Tractebel Engineering de réaliser en routine de nombreuses analyses de gestion et de sûreté, avec des méthodes et outils à la pointe du progrès, maintenant ainsi un haut niveau de compétence nucléaire en Belgique. Fin 2005, Tractebel Engineering comptait environ 400 agents totalement ou partiellement actif dans l'ingénierie nucléaire, pour un chiffre d'affaires d'environ 50 M euros.

II. Les études de sûreté et d'accident

Dès les années 1980, Tractebel Engineering, encouragé en cela par Electrabel, a investi pas mal d'effort dans la maîtrise des codes thermo-hydrauliques « best-estimate » faisant usage de modèles diphasiques et de corrélations de transfert de chaleur plus sophistiqués et ayant pour objectif une simulation plus réaliste du comportement du réacteur.

Après évaluation, il fut choisi de baser tout notre effort de développement sur le code RELAP-5 développé avec le support de l'USNRC, dont l'utilisation dans le cadre de l'octroi de permis était désormais autorisée. TE participa à l'effort commun d'évaluation et de validation du code au moyen des multiples installations d'essais à échelle réduite construites dans les années 1980. Cet effort se poursuivit dans les années 1990 en mettant l'accent sur l'amélioration des méthodologies de quantification des incertitudes et sur la consolidation du code pour en faciliter l'utilisation, la maintenance et le portage.

Enfin, un effort considérable (documentation, assurance de la qualité) a été consacré au licensing de l'utilisation du code RELAP-5 pour de multiples applications d'analyse de sûreté et d'accident.

Grâce à cet effort, TE a été en mesure de réaliser en routine de nombreuses analyses des transitoires non-LOCA des centrales *PWR* sur la base d'une méthodologie en sept étapes :

- un scénario d'accident bien défini et des critères d'acceptation cohérents avec les bases de conception et l'environnement de sûreté ;
- une version stable du code best-estimate, dont les capacités de modélisation des phénomènes physiques ont été validées ;
- une modélisation de la centrale standardisée et réaliste ;
- un cas de référence incluant des conservatismes et des incertitudes évidents ;
- une application enveloppe des biais et incertitudes du code *best estimate* ;
- un ensemble d'études paramétriques, pour déterminer les conditions initiales et aux limites conservatives ;
- un cas de *licensing*, qui combine tous les conservatismes et incertitudes.

Cette méthodologie a été appliquée dans les projets suivants :

- les études de justification de taux de bouchage plus élevés des tubes de générateurs de vapeur (GV) ;
- les études d'augmentation de puissance et d'allongement des cycles de Doel et Tihange ;
- les études génériques d'accidents hors dimensionnement (rupture de tubes GV, accidents graves, études en support aux plans d'urgence).

III. Les études de neutronique et de cœur

Dès la mise en service des centrales, Tractebel Engineering a été en charge d'une mission permanente de support à la gestion des cœurs et du combustible. Cette mission couvre divers domaines nécessitant la mise en œuvre de méthodes et d'outils de calcul : vérification de la conception des assemblages, conception des cœurs, évaluation de sûreté des cycles, suivi d'irradiations, optimisation des séquences de changement et réarrangement des cœurs, calculs de criticité, calcul de fluence neutronique.

L'objectif principal poursuivi était de pouvoir assurer en toute indépendance les meilleurs choix de gestion des cœurs, tant sur le plan de la sûreté que de l'économie.

Les codes de calculs utilisés dans les années 1970 et 1980 avaient souvent été développés partiellement en interne. C'était le cas en particulier de la chaîne de calcul neutronique Casmo – Mercator – Archimède (CMA), où le code d'assemblage CASMO (développé par Studsvik Scandpower génère les paramètres neutroniques qui étaient utilisés dans les codes de diffusion Mercator (distribution radiale de puissance 2D) et Archimède (distribution axiale 1D) développés par TE.

Cette chaîne a été utilisée pour les études de sûreté des cycles jusqu'à la fin des années 1990.

À cette époque cependant, l'émergence de gestions de cycle plus pointues a clairement mis en évidence que TE devait se doter d'un code tridimensionnel statique et dynamique. L'analyse du marché nous conduisit à adopter le package de codes LWRWIMS/PANTHER, commercialisés aujourd'hui par SERCO (UK).

Tractebel Engineering a donc entrepris dans les années 1990 un grand effort de développement et de validation des méthodologies de calcul des cœurs et d'analyse de sûreté pour toutes les unités belges et toutes les conditions d'exploitation. Ceci représentait un travail très important, car les cœurs des unités belges comportent 4 types de géométries (14x14, 2 boucles, 8 pieds ; 15x15, 3 boucles, 12 pieds ; 17x17, 3 boucles, 12 pieds ; 17x17, 3 boucles, 14 pieds) et plusieurs modes de gestions : cycles annuels en ¼ cœur et cycles de 18 mois avec cœurs fortement chargés en poison consommable, le gadolinium.

L'utilisation de cette chaîne de calcul 3D a été totalement validée en 2002 par AVN et est utilisée depuis en continu pour les évaluations de sûreté des recharges et pour préparer les données des essais physiques de suivi d'exploitation des cycles et d'aide au pilotage, par exploitation des codes NURAM, RABBIT et ARCHIMEDE, également développés par Tractebel Engineering et utilisés en routine pour les équipes d'exploitation d'Electrabel.

Un autre domaine majeur où Tractebel Engineering a développé des compétences de premier plan est celui des calculs thermo-hydrauliques du cœur. C'est à nouveau au début des années 1990 qu'un pas important est franchi par le choix du code COBRAIII-CP (développé par Siemens) comme outil de calcul thermo-hydraulique cœur. Après mise au point, validation et qualification de méthodologies d'applications adéquates, ce code est désormais utilisé en routine pour la qualification des combustibles et les évaluations *DNBR* pour toutes les centrales belges.

IV. Les méthodes couplées

Vers la fin des années 1990, la communauté internationale commença à s'intéresser au couplage des codes, car cette approche permet d'afficher de façon beaucoup plus correcte l'évolution réelle des transitoires tout en réduisant les sur-conservatismes inhérents à l'approche de découplage. Cette nouvelle approche était rendue possible par la disponibilité de codes qualifiés, d'ordinateurs suffisamment puissants et des protocoles de communication entre ordinateurs.

Conformément à son souci de rester à l'état de l'art, TE s'intéressa rapidement à cette nouvelle approche en vue de coupler le code thermo-

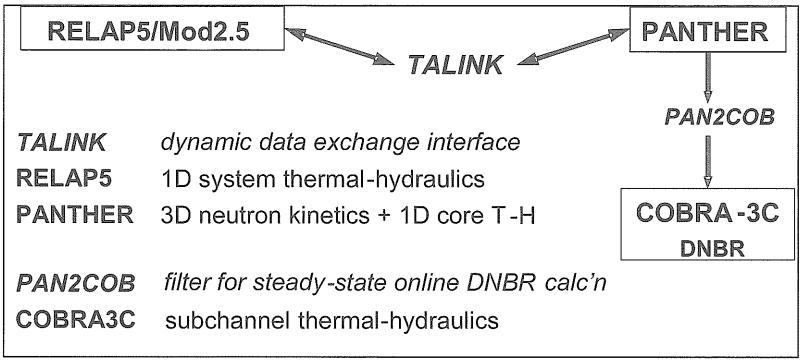
hydraulique système (RELAP-5) avec le code de neutronique cœur (PANTHER) et le code de calcul thermo-hydraulique de sous-canal du cœur (COBRA3C).

L'approche qui a été choisie par TE est basée sur un couplage dynamique externe des codes existants. Elle permet le meilleur usage de l'expertise acquise, avec un effort réduit à la validation du seul processus de couplage, car les codes ont été approuvés séparément.

Le couplage dynamique entre RELAP-5 et PANTHER est assuré au moyen du programme TALINK de liaison entre codes d'analyse de transitoires. Dans cette approche, RELAP-5 et PANTHER réalisent leurs calculs comme des codes clients sur des systèmes opératoires séparés, TALINK contrôlant l'échange des données.

Une interface complémentaire entre PANTHER et COBRA3C a été développée de façon à calculer en continu le DNBR durant le transitoire. Ce schéma est représenté sur la figure qui suit.

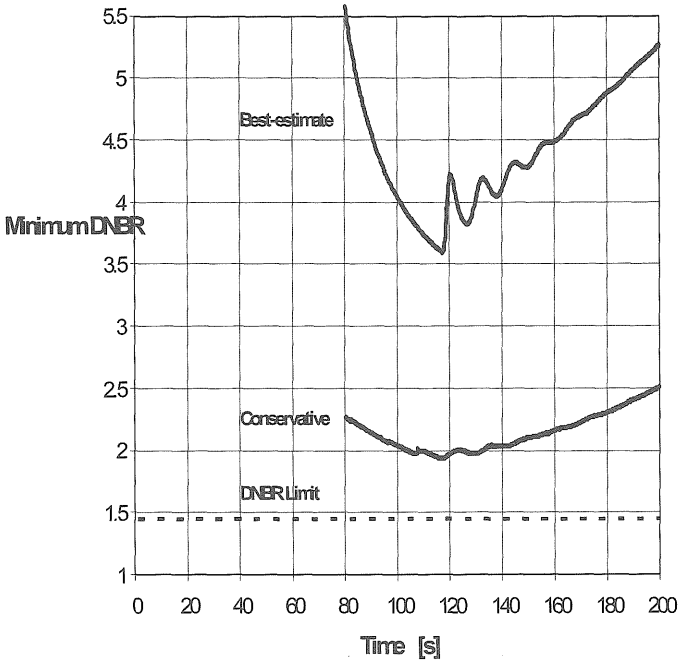
Figure 1 : Schéma de l'interface entre PANTHER et COBRA3C



Ce couplage a été qualifié en 2003 par l'analyse de l'accident de Rupture de Tuyauterie Vapeur (RTV) en arrêt à chaud, et appliqué avec succès pour la justification de l'augmentation de puissance de Doel 2, faisant de Tractebel Engineering une des premières sociétés à disposer de cet outil.

La figure 2 illustre la comparaison entre le calcul « *best-estimate* » et un calcul « conservatif », incorporant tous les conservatismes et incertitudes cohérents avec une méthodologie couplée. Elle montre qu'avec la méthode couplée, plus proche de la réalité physique, des marges considérables existent vis-à-vis du critère de licensing qui impose la valeur minimum de 1,45 pour le rapport entre le flux de chaleur critique calculé et le flux de chaleur maximum admis.

Figure 2 : Calcul de DNBR pour RTV en arrêt à chaud – comparaison entre méthode conservative et méthode couplée ou *best estimate*



La méthode est en cours d'extension pour traiter d'autres accidents (RTV en puissance et Rupture Tuyauterie Eau Alimentaire).

V. Les calculs mécaniques de structure

Ce domaine plus traditionnel de l'ingénierie a également fait l'objet de nombreux développements et applications, pour exploiter au mieux les méthodes de calcul modernes dans le cadre de la justification de nouvelles sollicitations ou de situations dégradées des équipements. Ces compétences, couplées à une connaissance précise des installations nucléaires belges et de leur fonctionnement, permettent lorsque nécessaire de fournir très rapidement des dossiers de justification solidement documentés. Ceci est illustré par quelques exemples.

A. Justification de composants

Durant la période 1990-2005, les générateurs de vapeur des unités belges ont été remplacés les uns après les autres. Simultanément, une aug-

mentation de puissance combinée avec un fonctionnement en *stretch-out* en fin de cycle était souvent programmée ce qui modifiait les transitoires de conception des composants primaires. Au fil des remplacements, TE a développé ses compétences en justification des composants primaires aux transitoires primaires modifiés et aux nouveaux accidents de référence jusqu'à pratiquement tout justifier lui-même lors du dernier remplacement survenu à Doel2 en 2004. Par exemple, l'enveloppe de pression des nouveaux générateurs a été entièrement justifiée par TE lors des 2 derniers remplacements.

La mise en œuvre du fonctionnement des unités belges en *stretch-out*, fonctionnement non pris en compte à la conception, rendait plus sévères les efforts thermo-hydrauliques dans les internes de la cuve dans le cas de l'accident de référence qui était la rupture de la tuyauterie primaire à n'importe quel endroit du circuit primaire et pouvait ainsi mettre en péril leur qualification de conception. Pour éliminer la prise en compte de ces ruptures dans l'accident de référence pour les internes de cuve, TE a démontré que pour les tuyauteries primaires de toutes les unités belges, le principe du « *Leak Before Break* » était applicable.

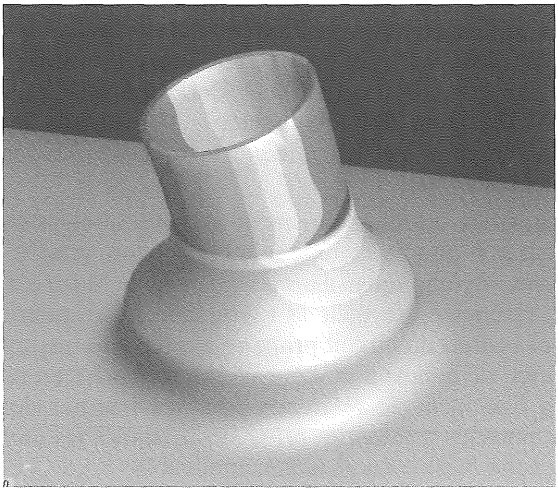
Les autorités de sûreté ont alors défini un nouvel accident de référence arbitraire propre à la Belgique pour justifier la tenue des internes de cuve, à savoir l'éjection instantanée du couvercle des trous d'homme coté primaire des générateurs de vapeur.

Étant donné quelques détails de conception atypique des internes de Doel2, leur qualification à ce nouvel accident de référence, même après une réduction de sa sévérité, a demandé à TE de réaliser des études dynamiques non linéaires pointues non conventionnelles pour ce type d'équipement.

Une importante campagne de réévaluation des composants (tuyauterie + équipements) principaux dont les composants primaires a été opérée pour les unités belges les plus anciennes (Doel1&2 et Tihange1) afin de les mettre au même niveau de qualification que les unités plus récentes (Doel3/4 et Tihange2/3). Cette réévaluation a été basée sur l'élaboration de modèles éléments finis très sophistiqués au moyen du code SYSTUS couplés à une redéfinition complète des transitoires subis par les composants. Cette méthode a permis de prolonger sans modifications la qualification de ces composants de 30 ans à 40 ans comme pour les autres unités.

Ci-dessous, la déformée obtenue par un modèle éléments finis sous l'application d'un moment d'un piquage d'une tuyauterie primaire sur une cuve de réacteur.

Figure 3 : Déformation d'un piquage d'une tuyauterie primaire sur une cuve de réacteur dûe à un moment de flexion



B. Qualification à la fatigue thermique

La qualification à la fatigue thermique des échangeurs régénérateurs de Doel1&2 et Tihange1 a demandé de faire appel à une campagne de mesure de température locale qui a permis de redéfinir de manière plus réaliste les transitoires de conception associés à la mise au point d'un modèle théorique d'échange de chaleur en mode transitoire entre les deux fluides.

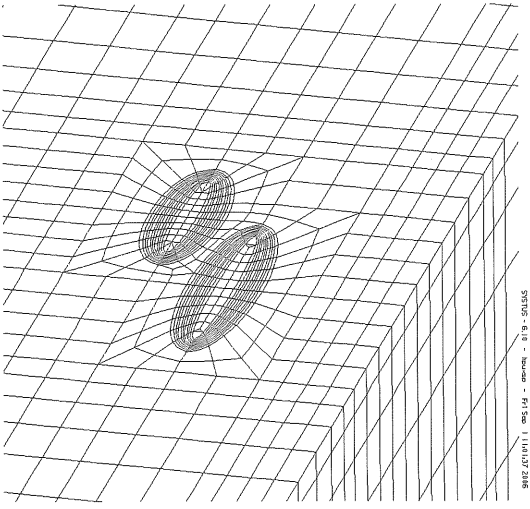
Une importante campagne de mesure de température échelonnée sur plusieurs années combinée avec le développement d'un important programme de calcul à la fatigue a permis à TE de prendre en compte et de justifier à la fatigue les transitoires de stratification thermique qui se produisent dans les lignes alimentant en eau les générateurs de vapeur et dans les lignes reliant le pressuriseur au circuit primaire de toutes les unités belges. La méthodologie mise en place par TE permet maintenant à l'exploitant de suivre lui-même la fatigue thermique dans les lignes d'eau alimentaire sur la base de la comptabilisation de quelques transitoires définis par TE.

C. Mécanique de la rupture

Le domaine de la mécanique de rupture a pour but de réaliser les études de nocivité des indications de fissures qui peuvent être détectées lors des campagnes d'inspection des équipements et tuyauteries.

Dans ce domaine, le software TEEPAC a été développé à partir de 1993 pour mettre en pratique les règles de justifications des défauts prescrites par le Code ASME XI (*rules for in-service inspection*). L'outil permet une justification plus rapide et plus fiable des indications détectées lors des arrêts de tranche. Le programme permet aussi de considérer toutes les situations vues par les équipements en utilisant directement les fichiers de contraintes et températures provenant de SYSTUS. L'outil peut également être utilisé pour réaliser des études 'conventionnelles' telle que la vérification à la rupture brutale (App G du Code ASME XI). TE a réalisé ce type d'étude par exemple pour les nouveaux générateurs de vapeur Mitsubishi installés dans la centrale de Doel 2.

Figure 4 : Modélisation de fissures par éléments finis



Le calcul de la propagation de ces fissures s'avère aussi nécessaire dans le cas des phénomènes de 'corrosion sous contrainte' tel qu'il peut être rencontré pour certains types des liaisons bi-métalliques.

TE réalise également les études de justification de fissures postulées (études de défauts sous revêtement, choc thermique pressurisé) ou des études du type *Defect Tolerance Analysis* destinées à définir des bons objectifs de détection pour la qualification des méthodes d'inspection.

TE a développé et développe encore des outils pour étudier des configurations spécifiques de fissures qui ne sont pas nécessairement couvertes par le Code ASME XI. Les outils passent généralement par une étude Elément-Finis spécifique plus fine qui inclut la fissure dans le maillage.

Cela permet d'étudier l'influence de défauts proches (voir image), de statuer sur les critères de regroupements de ces défauts, ou d'étudier des défauts de forme non conventionnelle.

VI. Le traitement des déchets et le démantèlement

A. Projets et réalisations

Au cours de la période 1990-2005, Tractebel Engineering a contribué à la réalisation de très nombreux projets dans différents domaines de l'aval du cycle nucléaire.

Les plus significatifs sont certainement ceux pour lesquels Tractebel Engineering et la Belgonucleaire sont intervenus ensemble, en Belgatom, pour assister l'ONDRAF dans la mise en œuvre de son programme de gestion des déchets radioactifs et en particulier de ses principaux investissements sur les sites de Belgoprocess, à savoir :

- la construction du bâtiment CILVA (1989-1995), pour le traitement et le conditionnement de tous les déchets de faible activité produits en Belgique ;
- la construction du bâtiment B136 (1988-1996), pour l'entreposage intérimaire des colis de déchets produits par le retraitement du combustible belge ;
- la construction du bâtiment B155 (1999-2002), pour l'entreposage intérimaire des déchets de catégorie B de faible activité ;
- la construction du bâtiment B280 (1997-2003), pour la récupération, le tri, la caractérisation radiologique et le conditionnement des déchets de la zone HRA / Solarium du site 2 de Belgoprocess.

D'autres projets importants ont été réalisés pendant la même période 1990-2005, notamment :

- la construction pour Electrabel des bâtiments DE à la centrale de Tihange et SCG à celle de Doel pour assurer l'entreposage du combustible irradié, suite à la décision politique en 1993 de ne pas poursuivre dans la voie du retraitement du combustible ;
- l'étude pour SYNATOM de la voie alternative dite du cycle ouvert (1993-2000), avec l'élaboration détaillée de l'avant-projet d'un atelier de conditionnement du combustible irradié, considéré comme un déchet ;
- le détachement d'un agent de Tractebel-Engineering, depuis 1990, dans l'équipe du SCK•CEN pour le démantèlement du réacteur BR3.

Ces principales réalisations étant rappelées, il est à épingler que, comme pour les autres activités de Tractebel Engineering, les projets qui ont été effectués durant cette période de 1990 à 2005 en Belgique et à l'étranger dans le domaine particulier de l'aval du cycle, ont également dans certains cas permis de développer des méthodes nouvelles et des outils nouveaux.

B. Outils et méthodes

Les développements les plus intéressants à rappeler ici sont ceux qui concernent la caractérisation radiologique des déchets et du combustible irradié (code FICAR), mais aussi, en collaboration avec le SCK•CEN, les applications informatiques VISIPLAN & VISIMODELLER.

1. Caractérisation des déchets radioactifs (codes LLWAA et DECL)

Suite à l'abandon en 1983 des rejets en mer de déchets radioactifs de faible et moyenne activités, l'ONDRAF a demandé aux producteurs de ne plus limiter leur caractérisation radiologique des déchets aux seuls isotopes mesurés, mais d'étendre la caractérisation à une série d'isotopes (appelés isotopes critiques, aujourd'hui au nombre de 27) qui sont à prendre en compte dans le cadre des études de la sûreté à long terme des dépôts géologiques.

Electrabel avait alors demandé à Tractebel Engineering d'établir des facteurs de corrélation entre isotopes aisément mesurables et isotopes critiques. C'est ainsi que le code LLWAA (*Low Level Waste Activity Assessment*) est né au début des années 1990.

L'ONDRAF a ensuite imposé la déclaration par le producteur de l'ensemble des isotopes critiques pour chaque demande d'enlèvement, en 1994 pour les déchets non conditionnés et en 1996 pour les déchets conditionnés.

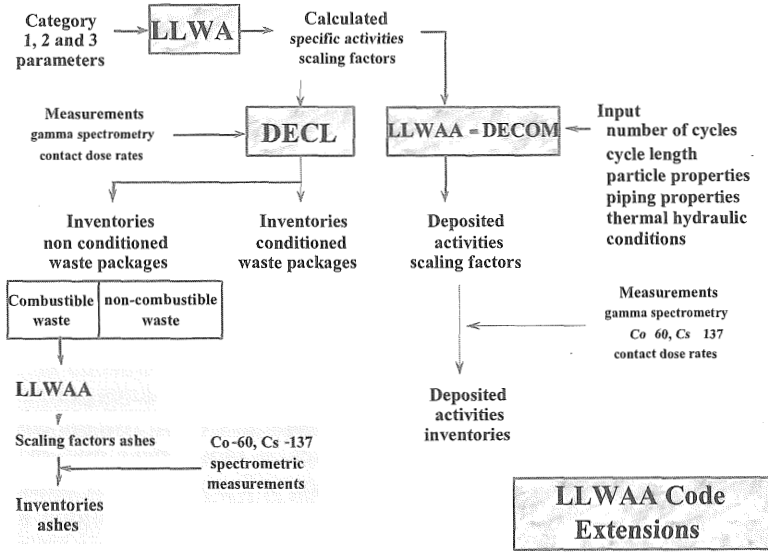
L'établissement, par Tractebel Engineering, des procédures permettant à Electrabel de calculer les inventaires isotopiques et de rédiger ensuite les demandes d'enlèvement correspondantes, a rapidement mis en évidence la nécessité de développer une gestion informatique des transferts de déchets à l'ONDRAF. Une nouvelle application informatique a été créée. Cette application combine le code de calcul LLWAA à un second programme, appelé DECL, dans le but de permettre directement aux équipes d'exploitation des sites de Doel et de Tihange de fournir les informations et les documents requis par l'ONDRAF.

Le code LLWAA est assez complexe. Il comprend de nombreux algorithmes qui permettent finalement de calculer les spectres isotopiques des

principaux flux de déchets produits par les différentes unités des deux centrales en se basant notamment sur :

- les phénomènes physico-chimiques à l'origine de la contamination du circuit primaire (produits de fission, produits de corrosion et d'activation, etc.) ;
- la modélisation des systèmes de traitement des effluents liquides à l'origine des déchets solides (filtres, résines échangeuses d'ions, boues d'évaporateurs, etc.) ;
- les différents paramètres de conception fixes ou variables des différentes unités et les paramètres d'exploitation variables en fonction des cycles du combustible et qui sont introduits annuellement dans le code, pour chaque unité ;
- les résultats disponibles pour des isotopes faciles à mesurer.

Figure 5 : Code LLWAA et ses extensions



La méthode de calcul LLWAA est validée tous les trois à cinq ans par des campagnes de mesures nucléaires en laboratoire, exécutées sur des échantillons prélevés sur les principaux types de déchets générés dans les centrales.

La méthode de calcul LLWAA a par ailleurs été analysée et approuvée par AVN pour le compte de l'ONDRAF.

Plus tard, vu le succès de la méthode, le code LLWAA a été étendu à d'autres applications, notamment pour la caractérisation radiologique des cendres (LLWAA-Ashes) produites par l'incinération de déchets radioactifs dans les installations du bâtiment CILVA exploitées par Belgoprocess.

Enfin, dans la foulée des utilisations précédentes, un module complémentaire a encore été développé et ajouté (LLWAA-DECOM) pour permettre la caractérisation radiologique de certains types de déchets de démantèlement, dans le cadre des évaluations de coûts réalisées pour Electrabel.

2. Caractérisation du combustible irradié (FICAR)

Au début des années 2000, le développement d'un programme spécifique (FICAR) a été lancé et est aujourd'hui opérationnel, pour permettre à SYNATOM d'effectuer la caractérisation radiologique des assemblages de combustible irradié.

Le code calcule les inventaires en radionucléides critiques dans la zone active du combustible et dans les structures, pour chaque assemblage et en tenant compte de son historique. Les résultats ainsi obtenus, ainsi que d'autres données utiles, comme l'activité totale α, β, γ, la puissance thermique résiduelle, etc., sont donnés à toute date souhaitée après la sortie du réacteur. Le code permet une gestion plus aisée des assemblages au cours des phases ultérieures d'entreposage intérimaire, de retraitement ou de stockage définitif.

3. VISIPLAN / VISIMODELLER

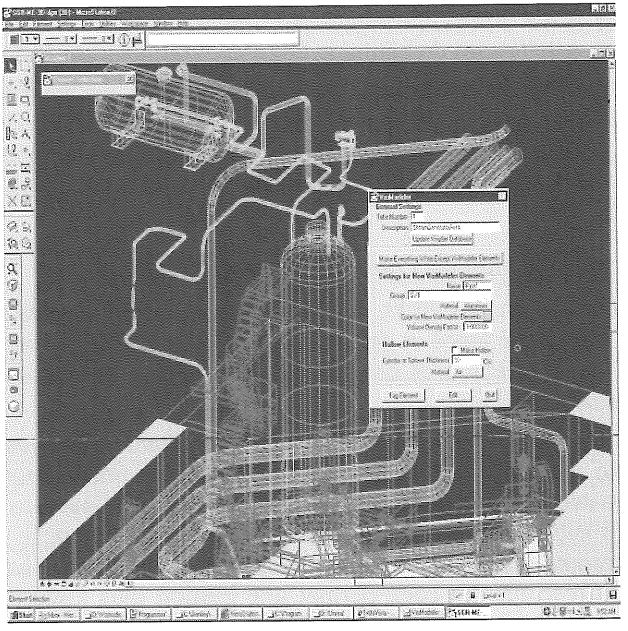
VISIPLAN est un logiciel qui tourne sur PC et qui a été développé par le Centre d'étude de l'énergie nucléaire (SCK•CEN). Ce programme peut être utilisé en radioprotection par des analystes ALARA pour calculer la dosimétrie du personnel dans un environnement nucléaire au cours d'interventions d'exploitation, de maintenance ou de démantèlement.

VISIMODELLER est un logiciel complémentaire, développé par Tractebel Engineering, qui permet d'introduire des modèles CAD existants (par exemple des plans d'installation) sous un format directement utilisable par VISIPLAN. Ce logiciel d'interface facilite grandement le travail de l'utilisateur et lui fait gagner du temps.

Les outils VISIPLAN / VISIMODELLER ont été utilisés pour la première fois pour le remplacement des GV de l'unité 2 de Tihange.

Ils ont été également utilisés dans le cadre d'un projet financé par la Commission européenne et destiné à préparer le démantèlement des unités 1&2 de la centrale bulgare de Kozloduy. Plusieurs licences ont aussi été vendues depuis lors.

Figure 6 : Logiciel VISIMODELLER



VII. La veille technologique en matière de nouveaux concepts de réacteurs

A. Introduction

Tractebel Engineering a toujours poursuivi une politique active de veille technologique dans le domaine des nouveaux concepts de réacteurs nucléaires, dans l'attente d'une reprise du marché. Cette politique a concerné aussi bien les réacteurs à eau pressurisée que les autres types de réacteurs : réacteurs à gaz à haute température et systèmes sous-critiques pilotés par un accélérateur, en exploitant notamment les possibilités de cofinancement de la Communauté européenne au travers de ses Programmes cadre. Par ailleurs, Tractebel Engineering a participé aux projets de développement de réacteurs de fusion. Outre l'aspect veille technolo-

gique, les différents projets de recherche et développement dans le domaine des nouveaux concepts de réacteurs ont permis à TE de maintenir ses compétences au niveau de l'état de l'art notamment par le développement de nouvelles approches et méthodes dont ont par ailleurs bénéficié les unités de production de Doel et de Tihange.

B. Réacteurs à eau pressurisée

Tractebel Engineering, représentant d'Electrabel, a été membre fondateur de *EUR* et a participé à la rédaction des « *European Utility Requirements (EUR)* » pour les nouvelles unités nucléaires, en axant principalement son activité sur la sûreté, la conception au séisme, l'îlot conventionnel et la déconstruction.

TE a également participé aux études de conception de l'EPR (conception générale des systèmes, études probabilistes, optimisation de l'exploitation et de la maintenance) et de l'EPP (version européenne de l'AP1000). Cette participation se poursuit toujours à l'heure actuelle.

C. Réacteurs à fusion contrôlée

On peut citer différentes participations de TE dans ce domaine :

- JET (UK)-TFTR (USA) : développement et support à l'exploitation du système d'acquisition des données.
- ITER : en tant que membre du consortium European Fusion Engineering and Technology (EFET), TE (via Belgatom) s'est vu confier un certain nombre d'études dans différents domaines et concernant différents composants ou systèmes : études de sûreté, études thermohydrauliques (chambre à vide, systèmes de refroidissement, participation au Licensing Working Group, études relatives à la distribution de la puissance électrique, études de sites).
- PPCS (Power Plant Conceptual Study) : en marge des études pour ITER, participation aux études de conception préliminaire de différentes options pour une installation de production d'électricité basée sur la fusion.

D. Concepts de IVe génération

Ici également, TE a apporté sa contribution à plusieurs programmes internationaux financés par les programmes R&D de la Communauté européenne :

- Participation de TE au réseau Michelangelo ou MICANET. L'objectif de ce réseau est d'apporter une assistance à la CE dans la définition des programmes de R&D dans le domaine des nouveaux concepts de réacteurs.

- HTR (*High Temperature Reactors*) *Technological Network* relatif au développement des réacteurs à gaz à haute température. Tractebel Engineering était notamment coordinateur du projet « *Safety Approach & Licensing* ».
- ADS (*Accelerator Driven Systems*) : développement de systèmes sous-critiques pilotés par un accélérateur, en vue de la transmutation des déchets radioactifs à longue durée de vie.
- RAPHAEL (*ReActor for Process heat, Hydrogen and ELectricity generation*). Ce projet fait suite aux projets HTR mentionnés ci-dessus et constituera une des contributions de l'Euratom au projet américain « Generation IV ». Tractebel Engineering est le coordinateur du sous-projet Safety, participe aux études d'intégration, et est membre de l'*Industrial Users Advisory Group* dont le rôle sera d'émettre des recommandations pour le développement de ces réacteurs.
- EUROTRANS (*European Research Programme for the Transmutation of high level nuclear waste in an accelerator driven system*) en liaison avec le projet MYRRHA du SCK•CEN.

VIII. L'aide aux pays de l'ex-Union soviétique

A. Introduction

Jusqu'à la fin des années 1980, l'implication du secteur nucléaire belge en Europe de l'Est se limitait à la participation aux missions de l'AIEA. Toutefois la prise de conscience internationale de l'état de sûreté des installations nucléaires de cette région qui suivit la catastrophe de Tchernobyl poussa la communauté internationale, et singulièrement la Commission européenne, à lancer de vastes programmes internationaux d'aide à l'ensemble du secteur nucléaire à l'Est : exploitants, autorités, et agences nationales. Fort des compétences acquises en Belgique et de son expérience des projets au grand international, Tractebel Engineering se mit rapidement sur les rangs, tantôt sous son propre nom, tantôt au travers de Belgatom et devint membre de plusieurs groupements et consortia constitués pour aider la Commission européenne à mettre en route ses programmes d'assistance.

On citera en particulier :

- le TPEG (*Twinning Programme Engineering Group*), groupement d'exploitants nucléaires en charge de la programmation, de la définition des termes de référence des projets Phare et Tacis et de leur suivi ;

- le groupement d'ingénieries ENAC, ayant pour objectif la réalisation d'études génériques d'évaluation des performances des réacteurs VVER – 440/213 et VVER – 1000/320.

Ces deux groupements seront actifs pendant près de dix ans.

B. Les projets pour les centrales nucléaires

Tractebel Engineering, avec le support d'Electrabel, a participé très activement à l'action d'*On-Site Assistance* (OSA) financée par la Commission européenne dans différentes centrales et en particulier à Kalinin (Russie), à South Ukraine (Ukraine) et à Medzamor (Arménie). Cette activité se poursuit toujours à l'heure actuelle, autour de deux axes :

- l'assistance opérationnelle et organisationnelle, focalisée sur l'amélioration continue des pratiques d'exploitation (qualité, sûreté, procédures, dosimétrie, facteur humain, plan d'urgence, etc.) ;
- la réalisation de projets de modernisation de sûreté des installations.

Ces missions ont été précédées par plusieurs contrats d'évaluation du niveau de sûreté des centrales existantes.

En parallèle, Tractebel a fourni (en partenariat avec CORYS et Siemens) des simulateurs multifonction pour les centrales (VVER) de Novovoronezh, Kola, Dukovany, Bohunice, Mochovce, Paks, Kozloduy et Medzamor, contribuant ainsi à améliorer grandement le niveau de formation des opérateurs.

Par ailleurs, et dans le cadre des budgets du *Nuclear Safety Account* (NSA) administré par la BERD, Tractebel a participé à plusieurs projets d'évaluation du niveau de sûreté et d'amélioration urgente de la sûreté notamment pour la centrale de Novovoronezh (Russie).

Enfin, Tractebel, comme membre d'un groupement avec EDF (France) et Fortum (Finlande), a participé pendant de nombreuses années au Project Management Group (PMG) chargé par la Commission européenne de définir et de finaliser le programme permettant de réaliser l'achèvement des centrales de Rovno 4 et Khmelnitzky 2 (Ukraine), dont la construction avait été arrêtée en même temps qu'une modernisation de la sûreté.

C. Les projets pour le traitement des déchets

Bien que la première priorité des programmes PHARE et TACIS était l'amélioration de la sûreté des centrales en exploitation, les projets relatifs à la gestion des déchets et du combustible usé reçurent une attention prépondérante à partir de 1995.

Plusieurs projets furent réalisés dans ce cadre par Tractebel, au travers de Belgatom (méthodologie pour la gestion et le stockage des déchets, support à la sélection des sites de stockage et d'enfouissement, amélioration de la gestion des déchets dans le Nord-Ouest de la Russie, modernisation d'installation de traitement, etc.).

Par ailleurs, Tractebel (toujours via Belgatom) a construit en partenariat avec SGN et Ansaldo, une installation de récupération, traitement et conditionnement des déchets liquides d'exploitation sur le site de Tchernobyl, un projet mené dans un environnement extrêmement complexe.

D. Les projets pour le démantèlement des centrales

Dans le cadre de l'accession à l'Union européenne, plusieurs pays candidats (Slovaquie, Bulgarie, Lituanie) ont accepté de mettre à l'arrêt et de démanteler leurs plus anciennes centrales nucléaires. Fort de ses compétences et de ses références, Tractebel a réalisé dans ce cadre plusieurs contrats et en particulier les études préliminaires du démantèlement des unités 1 et 2 de Kozloduy (Bulgarie) et la participation au Project Management Unit (PMU). Chargé de préparer et de coordonner les études de mise à l'arrêt définitif des unités 1 et 2 à Ignalina (Lituanie). Pour ce dernier contrat, Tractebel avait en charge les aspects de sûreté et de programmation du démantèlement (programme général, projet détaillé du démantèlement, Rapport de sûreté, Rapport d'impact sur l'environnement) ainsi que la gestion du projet de construction de l'unité de traitement et de conditionnement des déchets solides.

IX. Conclusions

À travers ces quelques pages, le lecteur aura découvert combien Tractebel Engineering a pu conserver et développer un savoir-faire de tout premier plan dans le domaine de l'ingénierie nucléaire, tant en support au fonctionnement et à la modernisation des centrales exploités par Electrabel en Belgique, qu'au travers de multiples contrats réalisés à l'étranger.

Electrabel
Quinze années de production nucléaire d'électricité en Belgique

Robert LECLÈRE

Administrateur délégué de la s.a. Synatom
Président du Forum nucléaire belge

I. Synthèse

Analyser les quinze dernières années de production nucléaire d'électricité en Belgique s'apparente à une gageure. Beaucoup, en effet, s'entendent à considérer que, sur cette période comprise entre le « non à N8 » et la loi de « phase out », l'énergie nucléaire a subi un rejet et connu un déclin.

Toutefois – et le montrer est, bien entendu, l'objet principal de notre participation à cet ouvrage –, au-delà du statu quo apparent, les électriciens belges ont poursuivi l'exploitation nucléaire avec sérieux et excellence. L'électronucléaire a consolidé ses positions en Belgique. Au moment où l'énergie nucléaire est l'objet d'un net regain d'intérêt dans le monde et semble devoir faire partie des solutions à trouver aux nombreux défis planétaires en matière d'énergie, les experts belges sont prêts à relever le défi.

A. Quinze années de méfiance et de rejet

Depuis vingt ans, l'industrie nucléaire a évolué dans un contexte général peu favorable à la construction de nouvelles unités. L'opinion publique a été marquée par l'accident de Tchernobyl. En Belgique, il en a résulté un report *sine die* de toute nouvelle centrale. Cette situation a perduré depuis le refus de N8 en 1988 jusqu'à l'adoption, en 2002, de la loi de retrait progressif du nucléaire, prévoyant que les unités arrêteraient la production après 40 ans de d'exploitation. Entre-temps, en Europe, le contexte de libéralisation du marché et de surcapacités dans les années 1990 n'a pas favorisé les investissements massifs, lourds et à long terme.

B. Quinze années de performances remarquables

Sur la même période, le bilan d'exploitation des unités nucléaires existantes est remarquable en matière d'efficacité et de sûreté. Ce n'est qu'un paradoxe apparent : durant ces quinze années perçues de l'extérieur comme celles d'une léthargie, le bilan de l'exploitation nucléaire en Belgique fut remarquable. Grâce à d'importants investissements réalisés sur les centrales existantes lors des révisions décennales, la puissance nucléaire installée s'est accrue notablement et ce malgré l'absence de toute nouvelle mise en service sur la période. Les taux d'utilisation et donc la production ont atteint des niveaux très élevés dans le respect absolu de la sûreté. En 2005, le nucléaire continuait ainsi à couvrir 55 % de la consommation belge d'électricité.

En outre, en accord avec les autorités, la Belgique a adopté de nouvelles dispositions de gestion des provisions financières relatives au démantèlement futur des centrales.

C. Une gestion maîtrisée du combustible

Les deux filières – cycles ouvert ou fermé – de gestion du combustible usé restent ouvertes. En matière d'approvisionnement en combustible nucléaire, la Belgique a adopté une politique prudente, qui s'est avérée judicieuse. Par ailleurs, malgré le moratoire de 1993 relatif à l'arrêt du retraitement du combustible usé (cycle fermé), l'industrie a pu participer à la démonstration de la faisabilité industrielle de cette filière.

D. Le nucléaire garde sa place

Aujourd'hui, le contexte et l'opinion publique évoluent en faveur du nucléaire et des arguments qu'il a à faire valoir. Si la période s'est donc apparentée à une parenthèse, dans les faits, l'industrie nucléaire n'est pas sur la touche. Le niveau de ses performances confirme que si l'électronucléaire n'est pas la solution, sans lui, il n'y a pas de solution aux problématiques environnementales, stratégiques et générales liées à l'énergie.

II. Quinze années de méfiance et de rejet

Afin de pouvoir mettre en perspective tous les éléments de cette contribution, il nous faut remonter à des faits intervenus juste avant la période sous revue dans cet ouvrage : en 1988, le Gouvernement belge exclut la construction d'une huitième centrale nucléaire.

Cette décision, qui restera dans les mémoires comme le dossier N8, va avoir un impact déterminant sur la production d'électricité par la voie nucléaire durant les deux décennies suivantes. Elle va ouvrir en quelque sorte une parenthèse. Les conséquences du choix politique belge pour-

raient ainsi tenir en quelques mots : durant la période évoquée par cet ouvrage, le parc nucléaire belge est resté constant, du moins en nombre d'unités exploitées.

A. Les électriciens réclamaient une huitième centrale nucléaire belge

Flash-back sur 1988 pour ouvrir cette chronique. Robert Van Den Damme, Hubert Dresse et Jean-Pierre Gillon l'expliquaient dans le tome précédent de cet ouvrage, N8 (PWR, 1400 MW) figurait au plan d'équipement 1983-1993. De plus, elle faisait l'objet d'accords avec la France. EDF devait participer à hauteur de 50 % dans l'investissement à Doel, tandis que les sociétés électriques belges étaient associées à concurrence de 25 % dans deux nouvelles unités, B1 et B2 (PWR, chacune 1 500 MW). Celles-ci devaient être installées dans un des hauts lieux historiques de la coopération nucléaire franco-belge : à Chooz, au cœur des Ardennes françaises.

En ce qui concerne N8, à Doel, certaines commandes (avec indemnités de retard à la clef) étaient déjà passées et des travaux sur site avaient commencé.

C'est dans ce contexte que le Comité de gestion des entreprises d'électricité dépose, au mois d'octobre 1988, un nouveau plan d'équipement. Il porte sur la période 1988-1998. Quelques mois plus tôt, plus exactement en mai, le nouveau Gouvernement (Martens VIII) avait demandé aux entreprises d'électricité qu'« un large éventail de scénarios soit établi, avec une priorité pour ceux qui excluent une nouvelle entité nucléaire en Belgique ».

Les électriciens s'étaient pliés à cette exigence. Ils avaient établi 24 scénarios, 12 incluant l'option d'une nouvelle unité nucléaire et 12 l'excluant. Plusieurs variables constituaient les hypothèses : taux de croissance de la consommation annuelle, cours du dollar et évolution du prix des combustibles.

La conclusion du Comité de gestion des entreprises d'électricité (CGEE) était sans appel. Dans tous les cas, les plans renonçant au nucléaire présentaient des surcoûts très importants, de 4 à 106 milliards de francs belges selon les scénarios. Les analyses annexes donnaient, de plus, l'avantage au nucléaire en matière d'impact environnemental, d'impact socio-économique et d'effet sur la balance nationale des paiements.

B. Le Gouvernement a décidé de ne pas donner son feu vert à N8

Le contexte était tel que certains commentateurs n'hésitaient pourtant pas à évoquer un « baroud d'honneur », voire un « exercice de style » de

la part des électriciens. Faut-il rappeler qu'en octobre 1987, autrement dit peu après Tchernobyl, un sondage « La Libre Belgique-Marketing Unit » avait dévoilé que deux belges sur trois étaient opposés au projet N8 ?

Comme on pouvait s'y attendre, le Gouvernement belge refusa finalement l'option d'une huitième centrale nucléaire en Belgique. Par contre, il marqua son accord à la participation belge en Chooz B1 et B2.

Comme l'écrivaient Robert Van Den Damme, Hubert Dresse et Jean-Pierre Gillon dans le tome précédent de cet ouvrage :

> Les électriciens durent donc mettre fin au projet N8 et payer aux constructeurs français les dédommagements qui leur étaient dus par suite du non-respect des engagements pris à leur égard en 1984. Ils durent également amortir dans leurs comptes les dépenses d'investissement consenties pour Doel 5. Cette décision ébranlait gravement les fabricants belges d'équipements nucléaires et conduisit à une importante dépense non productive[1].

Voilà donc l'événement fondateur, la raison principale du statu quo du parc nucléaire belge durant les vingt dernières années. À partir de ce moment, peu ou prou, l'attitude des électriciens belges s'est apparentée à une forme de politique du « gros dos » (qui sera encore renforcée en 2002 lors de l'adoption politique du « *phase out* » ; voir plus loin) mais qui ne se traduira jamais par une politique de repli car l'enjeu fut bien de poursuivre une exploitation sûre et efficace du parc existant, et de cultiver une excellence technologique et managériale.

C. La libéralisation du marché a créé en général un contexte de grande incertitude sur les investissements

Aux alentours de l'année 1993, c'est le débat sur le retraitement des combustibles nucléaires usés qui fait rage. Il s'agit d'une nouvelle charge antinucléaire. Ce débat s'inscrit dans un contexte d'opinion publique peu favorable (voir le chapitre consacré au cycle du combustible).

Pendant ce temps, les investissements commencent dans les premières Turbines Gaz Vapeur (TGV) sur lesquelles reposait finalement le plan d'équipement 1988-1998 approuvé par les autorités belges. Les TGV de Drogenbos et Seraing (toutes deux d'une puissance de 460 MW) sont mises en service respectivement en avril et septembre 1994.

Elles seront suivies par d'autres centrales confirmant l'importance prise par la technologie Turbine Gaz Vapeur et le gaz naturel dans le panel des énergies primaires utilisées pour produire l'électricité en Belgique et au Luxembourg : Herdersburg (460 MW), Gent-Ringvaart

---

[1] Govaerts, P., Jaumotte, A., et Vanderlinden, J., *Un demi-siècle de nucléaire en Belgique, Témoignages, Mémoire d'Europe*, Bruxelles, Presses interuniversitaires européennes (P.I.E.), p. 589.

(350 MW), Saint-Ghislain (350 MW), Vilvoorde (385 MW) et Esch-sur-Alzette (376,4 MW).

Par contre, dès le début des années 1990, le projet de grande centrale au charbon connaît de considérables atermoiements. Au départ, ceux-ci résultent principalement d'une forte opposition de type « NIMBY » (*Not In My Back Yard*). Progressivement, les électriciens eux-mêmes vont « mettre la pédale douce ». Ils hésitent notamment, du fait de la libéralisation et de l'incertitude engendrée, à investir aussi massivement alors que leur capacité d'anticipation se voit freinée par de nouvelles contingences qui apparaissent sur le marché de l'électricité : la fin des années 1990 et le début des années 2000 sont effectivement celles de l'ouverture du marché de l'électricité en Europe, jalonnées au départ d'incertitudes sur les modalités de mise en œuvre de la libéralisation.

D. Pas de nouveau projet nucléaire

Les circonstances politiques liées à l'opinion publique et à l'impact désastreux de l'accident de Tchernobyl ne sont plus les seuls éléments qui, dès lors, mettent sous l'éteignoir le débat sur l'opportunité d'une nouvelle centrale nucléaire belge.

Dans un document de synthèse du dernier plan d'équipement déposé en Belgique par les électriciens, celui portant sur la période 1995-2005, on peut ainsi lire :

> Dans le cadre du récent programme d'équipement, le CGEE n'envisage pas la construction de nouvelles centrales nucléaires au-delà des décisions prises lors des plans précédents. Toutefois, en raison de ses avantages économiques et écologiques, l'option nucléaire ne peut être écartée à long terme.[2]

Ce plan d'équipement, outre qu'il table toujours sur les 750 MW qui proviendront de France lorsque seront couplées Chooz B1 et Chooz B2, donne toute priorité au gaz naturel (TGV et cogénération) pour satisfaire les besoins futurs.

Une des excellentes raisons à ce « ralenti » sur d'éventuels nouveaux investissements nucléaires fut le processus entamé par l'Europe dans la voie de la libéralisation des marchés de l'énergie, couplé à ce moment à d'importantes surcapacités de production. Vu les incertitudes de court, moyen et long terme qu'elle génère, les électriciens sont peu enclins à choisir d'investir dans des équipements dont la construction nécessite une dizaine d'années et qui s'amortissent sur trente ans et plus.

---

[2] Programme national d'équipement en moyens de production et de transport d'énergie électrique 1995-2005, Résumé et Commentaires, p. 40.

E. La Commission AMPERE est chargée en 1999 d'une étude prospective

La fin des années 1990 s'inscrit globalement dans un contexte de grandes incertitudes, liées à la libéralisation en cours en Europe mais aussi à l'évolution des dossiers environnementaux – plus particulièrement au réchauffement climatique – et aux inquiétudes en matière de sécurité d'approvisionnement.

Dans ce contexte, le Gouvernement Dehaene met en place la Commission AMPERE, composée de scientifiques et experts belges, reconnus et indépendants. L'acronyme définit bien la tâche qui lui est confiée : « Commission pour l'analyse des modes de production de l'électricité et le redéploiement des énergies ». Dès l'origine, il est prévu que les recommandations de la Commission seront soumises à un Collège d'experts internationaux tout aussi indépendants. Le chapitre sur la Commission AMPERE.

La façon dont le dossier va évoluer est singulière. En date du 12 juillet 1999, le Gouvernement qui avait institué la Commission AMPERE est remplacé par une nouvelle coalition. La déclaration gouvernementale inclut l'option d'arrêter les centrales nucléaires belges après quarante ans de fonctionnement, tout en respectant les objectifs fixés par le sommet de Rio et le protocole de Kyoto quant aux émissions de CO_2.

Très exactement, les termes de l'accord de gouvernement sont les suivants :

> Le gouvernement est prêt à s'engager dans la sortie progressive de l'énergie nucléaire à terme et ce, en respectant les objectifs fixés par la conférence de Rio et le protocole de Kyoto quant aux émissions de CO_2. Afin de laisser aux scientifiques le temps nécessaire à la mise au point de nouvelles sources massives d'énergie, alternatives, renouvelables et propres, la Belgique s'inscrit dans un scénario au terme duquel le désactivation des centrales nucléaires sera entamée dès qu'elles auront atteint l'âge de quarante ans. Le gouvernement consultera l'Agence européenne pour l'Environnement et interrogera une commission d'experts internationaux désignés par lui sur la faisabilité et la mise en œuvre de ce scénario[3].

Le Gouvernement Verhofstadt confirme par arrêté royal la mission de la Commission AMPERE en l'élargissant à la prise en compte de la sortie du nucléaire prévue dans la déclaration gouvernementale, des meilleures pratiques de maîtrise de la demande, des engagements découlant du protocole de Kyoto et des coûts de gestion des déchets et du démantèlement.

---

[3] Accord de gouvernement, 7 juillet 1999.

F. Un consensus s'établit sur la nécessité de ne pas fermer l'option nucléaire

Dans le même temps, la Commission AMPERE poursuit ses travaux. En octobre 2000, elle remet ses recommandations. Très complet et nuancé, le rapport conclut notamment : « La Commission est d'avis qu'il convient de maintenir l'option électronucléaire ouverte pour le futur dans un contexte de renchérissement des hydrocarbures et eu égard à l'absence d'émission de gaz à effet de serre ».

Composée d'experts, la Commission rejoint ainsi une opinion qui, au début des années 2000, est en train de prendre forme et va continuer à se renforcer d'année en année, à savoir que le nucléaire n'est certainement pas la solution exclusive à la problématique énergétique, mais que, sans recourir au nucléaire, il n'y a probablement pas de solution globale et qu'il ne faut donc surtout pas fermer cette option.

En 2001, la Synthèse du Livre vert de la Commission européenne, « Vers une stratégie européenne de sécurité d'approvisionnement énergétique », constate : « La stratégie à long terme de sécurité des approvisionnements énergétiques de l'Union européenne doit viser à assurer, pour le bien-être des citoyens et le bon fonctionnement de l'économie, la disponibilité physique et continue des produits énergétiques sur le marché, à un prix accessible à tous les consommateurs (privés et industriels), dans le respect des préoccupations environnementales et la perspective du développement durable que s'est assigné le traité de l'Union européenne »[4]. Et il ajoute : « La contribution à moyen terme du nucléaire doit faire, à son tour, l'objet d'une analyse ».

En avril 2001, dans le respect de la procédure initialement prévue, le Collège d'experts internationaux valide les recommandations de la Commission AMPERE. En octobre 2001, le Communiqué de presse que publie l'Agence internationale de l'énergie (IEA – *International Energy Agency*) à l'occasion de la sortie du rapport « *Energy Policies of IEA Countries – Belgium, 2001* » est sans équivoque :

> En Belgique, l'énergie nucléaire satisfait près de 60 % de la consommation électrique nationale et 22 % de la demande énergétique totale. L'Agence internationale de l'énergie (AIE) a indiqué qu'il ne serait pas aisé de trouver une alternative adéquate et efficace à l'énergie nucléaire, qui soit aussi économique et à l'origine d'aussi peu d'émissions. L'AIE a dès lors recommandé au gouvernement belge de garder ouverte l'option nucléaire jusqu'à ce qu'une analyse et une évaluation de différentes options technologiques économiquement et écologiquement fiables soient disponible.

---

4 Livre vert de la Commission européenne, « Vers une stratégie européenne de sécurité d'approvisionnement énergétique », Office des communications officielles des communautés européennes, p. 2.

G. La Belgique a finalement adopté la loi dite de « phase out »

Ce faisceau concordant, qui ne fera que se renforcer, n'infléchit pourtant pas le Gouvernement. En mars 2002, un projet de loi de sortie progressive de l'énergie nucléaire à des fins de production industrielle d'électricité est déposé. Elle sera votée en fin janvier 2003, en ce compris son article 3 portant que « Les centrales nucléaires destinées à la production industrielle d'électricité à partir de la fission de combustibles nucléaires sont désactivées quarante ans après la date de leur mise en service industrielle et ne peuvent plus produire d'électricité dès cet instant »[5]. Le chapitre traitant la loi sur la sortie du nucléaire donne plus de détails sur sa genèse.

Un article de la loi évoque la possibilité d'une marche arrière en « cas de force majeure », cette disposition étant liée à des menaces sur la sécurité d'approvisionnement du pays. La loi est donc réversible. Il est singulier de constater que le législateur belge n'envisage pas comment seront remplacées les centrales nucléaires.

Electrabel, en la matière, a complètement rejoint une conclusion de la Commission AMPERE, à savoir qu'aucune raison scientifique, technique, écologique ni économique ne justifiait de décider, en 2002, d'arrêter les centrales nucléaires à partir de 2015. Cette argumentation reste valable aujourd'hui. Si la loi est maintenue, c'est effectivement dans moins de dix ans, en 2015, que devraient être mises hors service Tihange 1, Doel 1 et Doel 2. Suivraient Doel 3 (2022), Tihange 2 (2023), Doel 4 (2025) et Tihange 3 (2025).

Durant toute cette période hostile, le discours des électriciens est resté très ferme, clair et constant : notre parc nucléaire est un des plus performants au monde, son exploitation sûre constitue le fondement de l'approvisionnement national, les circonstances actuelles ne sont pas favorables à de nouveaux investissements, mais la porte reste ouverte et le temps du nucléaire reviendra.

III. Quinze années de performances remarquables

Le gouvernement belge a donc refusé en 1988 l'installation d'une huitième centrale nucléaire, tout en avalisant la participation des électriciens aux investissements à Chooz. Le plan d'équipement suivant, déposé fin 1995, a fait d'initiative l'impasse sur toute proposition de nouvelle unité. Malgré ces événements, notamment grâce à des investissements réalisés sur les unités existantes lors des révisions décennales, le parc nucléaire

---

[5] Loi sur la sortie progressive de l'énergie nucléaire à des fins de production industrielle d'électricité, 31 janvier 2003.

belge a, sur les quinze dernières années, vu s'accroître sa puissance installée, pour atteindre, au début 2006, 5 824,5 MW.

A. À quelques kilomètres de la frontière belge, deux unités en partie belges

Comme prévu par le plan d'équipement 1988-1998 qui avait abouti au refus de N8, la participation aux unités françaises de Chooz B a suivi son cours. Les électriciens belges étaient associés à hauteur de 25 % dans cet énorme projet, localisé en bord de Meuse à quelques kilomètres de la Belgique. Les travaux avaient débuté en 1982. D'une capacité unitaire de 1 500 MW, les unités Chooz B1 et Chooz B2 ont respectivement démarré en août 1996 et avril 1997, soit avec cinq ans de retard sur le planning initial.

Le report s'expliquait par des problèmes liés à la mise en place d'un nouveau concept de contrôle-commande et de salle de contrôle et par des difficultés rencontrées avec les grappes de contrôle dont la vitesse de chute dans le réacteur (pour arrêter la réaction nucléaire) était trop lente, difficultés que Framatome avait connues précédemment sur les centrales chinoises de Daya Bay.

Tout en n'hypothéquant pas la sûreté des centrales, ces aléas n'en ont pas moins retardé leur mise en service. Une solution temporaire a été adoptée en fin d'année 1992 avec EDF afin que les Belges, qui comptaient sur ces capacités qu'ils avaient partiellement financées, puissent « disposer entre-temps de 200 MW de puissance fournie par le réseau français à des conditions économiques intéressantes »[6].

Ceci étant dit, la mise en service de Chooz B1 et Chooz B2 est la dernière concrétisation en date de la coopération nucléaire entre EDF et les électriciens belges. Ces derniers ont ainsi bénéficié de 750 MW de puissance nucléaire nouvelle (650 pour Electrabel et 100 pour SPE). Pour mémoire, EDF est pour sa part associée à hauteur de 50 % en Tihange 1 (soit 50 % de 962 MW).

B. Avec les travaux à Doel 1 en 2009, l'ensemble des générateurs de vapeur du parc belge aura été remplacé en quinze ans

Durant la période visée par cette contribution, les investissements se sont poursuivis dans les sept centrales belges existantes. Sur les quinze dernières années, soit de 1990 à 2005, les investissements consentis se chiffrent au total à près d'un milliard d'euros. Le remplacement de certains équipements (générateurs de vapeur, turbines) par d'autres plus per-

---

6 Govaerts, P., Jaumotte, A., et Vanderlinden, J., *Un demi-siècle de nucléaire en Belgique*, *op. cit.*, p. 588.

formants, outre un renforcement du niveau de sûreté, ont permis un accroissement significatif des capacités de production.

En 1993, c'est à Doel 3 que s'amorcent les grandes manœuvres qui conduiront au remplacement de tous les générateurs de vapeur du parc nucléaire belge. Elles s'achèveront en 2009 avec Doel 1, qui sera ainsi la dernière unité à connaître le remplacement de ces équipements.

Les générateurs de vapeur sont de très grands échangeurs de chaleur de 25 mètres de haut, cinq mètres de diamètre et d'un poids supérieur à 300 t. Ils jouent un rôle clé dans l'électricité nucléaire, aussi bien en termes de technologie de production qu'en termes de sûreté. En fait, en plus d'échanger de la chaleur, ils constituent une barrière entre les circuits primaire et secondaire. C'est en leur sein que l'eau du circuit primaire peut transmettre à l'eau du circuit secondaire la chaleur qui lui a été cédée par la fission nucléaire.

L'eau chaude à très haute pression du circuit primaire circule au travers d'un faisceau étanche comportant plus de cinq mille tubes en U. L'eau du circuit secondaire circule à l'extérieur de ce faisceau, mais, au contact des tubes, elle entre en ébullition et se transforme en vapeur qui actionne la turbine et le générateur, produisant ainsi l'électricité.

Les règles élémentaires de sûreté conduisent à se montrer particulièrement vigilant lors des révisions périodiques quant à l'état d'étanchéité du faisceau tubulaire, et ce afin d'éviter tout risque de fuite d'eau du circuit primaire vers le circuit secondaire. Ainsi, une importante campagne de réparation a été menée à Doel 4 en 1995, soit un an avant le remplacement des générateurs de vapeur.

Mais, comme on le constatait déjà dans l'édition précédente de cet ouvrage :

> Peu de centrales à eau pressurisée échappent aux problèmes, notamment de corrosion sous tension, des tubes des générateurs de vapeur ; ceux-ci conduisent à terme au remplacement de ces équipements. À la suite des inspections auxquelles on procède chaque année lors des révisions annuelles, les unités belges connaissent également un taux croissant de bouchage des tubes. Ces bouchages ayant une limite tant pratique que réglementaire, il a été décidé de remplacer respectivement en 1993, 1995 et 1996 les générateurs de vapeur les plus affectés, soit ceux de Doel 3, Tihange 1 et Doel 4 [7].

C'est bel et bien ce qui a été accompli.

---

[7] *Ibid.*, p. 594.

C. En quinze ans, des investissements considérables ont été réalisés

En 1993, les 3 premiers nouveaux générateurs de vapeur fabriqués par KWU-Siemens sont installés à Doel 3.

En 1995, la seconde révision décennale de Tihange 1 est mise à profit pour la mise en œuvre d'un chantier qui s'étale sur plus de 90 jours. Aux opérations traditionnelles de révision, sont adjoints des travaux importants pour le remplacement des trois générateurs de vapeur (grande première, ceux-ci proviennent du Japon et ont été fabriqués par Mitsubishi). Les rotors des turbines basse pression sont également remplacés (fabrication par GEC-Alsthom). Ces investissements apportent à l'unité un gain de puissance de 99 MW (dont 49,5 MW de quote-part belge, Tihange 1 étant une centrale 50-50 avec EDF), s'expliquant par une surface d'échange plus importante dans les générateurs de vapeur et une meilleure conception des rotors, l'un et l'autre accroissant la capacité nominale.

En 1995 et 1996, c'est au tour de Tihange 2 de gagner 51 MW de puissance suite à des travaux spécifiques en ce sens et au remplacement des rotors de la turbine basse pression (fabrication de GEC-Alsthom). Doel 3, qui a bénéficié d'investissements équivalents la même année, gagne également 25 MW.

Les générateurs de vapeur seront ensuite remplacés à Doel 4 en 1996 (fabrication de KWU-Siemens-Framatome) en même temps que les condenseurs, en 1998 à Tihange 3 (fabrication de Framatome-Siemens), en 2001 à Tihange 2 (fabrication de Mitsubishi ; gain de 48 MW) et en 2004 à Doel 2 (fabrication de Mitsubishi ; gain de 40 MW).

Les générateurs de vapeur remplacés sont stockés sur les sites de Doel et Tihange.

Mais, il ne faudrait pas pour autant perdre de vue le remplacement d'autres composants importants comme le couvercle de cuve de Tihange 1 et les corps d'échange des tours de refroidissement, sans oublier divers matériels électriques dont des transformateurs et des matériels de contrôle-commande.

Tableau 1 : Investissements faits dans les centrales nucléaires belges

Unité	Date	Investissements
Tihange 1	1995	Générateurs de vapeur, livraison par Mitsubishi H.I, installation par Framatome – Siemens – Fabricom – TEE
	1995	Rotor de turbine basse pression, livraison et installation par Gec-Alsthom
Tihange 2	1995	Augmentation de puissance, Framatome
	1996	Rotor de turbine basse pression, Gec-Alsthom
	2001	Générateurs de vapeur, livraison par Mitsubishi et installation pas Westinghouse
	2006	Remplacement du *packing* du réfrigérant, Hamon Thermal Europe
Tihange 3	1998	Générateurs de vapeur, livraison par Framatome – Siemens et installation par Westinghouse – PCI
	2006	Remplacement du *packing* du réfrigérant, Hamon Thermal Europe
Doel 1/2	2004	Générateurs de vapeur, livraison par Mitsubishi
Doel 3	1993	Générateurs de vapeur, livraison par KWU – Siemens et installation par KWU – Fabricom – TEE
	1996	Rotor de turbine basse pression, Gec – Alsthom
Doel 4	1996	Générateurs de vapeur, KWU – Siemens – Framatome
	1996	Condenseur, GEC – Alsthom – Delas

D. Sur les quinze années, les sept centrales belges ont enregistré de très bons résultats d'exploitation

Par leur nature même et vu leurs caractéristiques, les centrales nucléaires sont vouées à une production de base dans un système électrique. En l'occurrence, sur la période 1990-2005, en Belgique, la comparaison des coûts de production a de toute façon encouragé cette utilisation en base.

Sur ces quinze années, les sept unités nucléaires belges ont tourné avec un taux d'utilisation très élevé, une politique stricte de qualité et de sûreté permettant de réduire au minimum les arrêts de production. À titre d'exemple, en 2001, le remplacement des trois générateurs de vapeur de Tihange 2 a été réalisé en 17 jours, ce qui constituait un record à l'échelle internationale. De même, grâce à une organisation performante, à l'expérience interne et à celle des entreprises d'ingénierie, les périodes consacrées aux entretiens ont été réduites de façon significative.

Sur les seize dernières années (1990-2005), les sept unités nucléaires belges ont produit un total de 688 TWh, représentant sur la période 57,8 % de la consommation belge. La part occupée dans la production nationale d'électricité n'a décru que faiblement (60 % en 1990, 55 % en 2005) alors que la consommation, elle, continuait à croître.

De tels niveaux de production ont été atteints moyennant, non seulement d'excellents taux d'utilisation des équipements, encore en amélioration par rapport aux périodes précédentes, mais aussi grâce à l'allongement des cycles de fonctionnement que permettent une augmentation de l'enrichissement du combustible et des taux de combustion plus élevés. Pour mémoire, le taux d'utilisation est le rapport entre l'énergie électrique réellement produite et l'énergie qui serait productible si la centrale ne s'arrêtait jamais et tournait donc en continu à sa puissance nominale. Le parc nucléaire belge a affiché ces dernières années des taux d'utilisation de l'ordre de 90 %. Il était de 89,2 % en 2005 alors que, sur la période 1976 à 2005, le taux d'utilisation cumulé avoisine les 84 %.

E. Sûreté de fonctionnement

Cet accroissement des performances a été réalisé dans le respect absolu de la sûreté de fonctionnement, contrôlée par les autorités extérieures compétentes et placée sous la surveillance d'un organisme agréé. À cet égard, l'obligation légale de révision spéciale de sûreté tous les dix ans et la prise en compte du retour d'expérience dans les unités de production étrangères ont joué un rôle positif dans l'exploitation des centrales belges.

Ensemble, les sept unités nucléaires belges comptent 154 années cumulées de fonctionnement. Sur cette période, aucun incident à caractère nucléaire n'a entraîné un danger quelconque pour la population ou le personnel exploitant ou même encore pour le milieu naturel.

Les rejets radioactifs liquides et atmosphériques sont toujours restés bien inférieurs aux limites sévères imposées par les pouvoirs publics et, pour tous les isotopes, entre 0,1 à 10 % des limites réglementaires ; la seule exception est le tritium sous forme liquide, émetteur Beta de faible énergie dont la production est inéluctable dans un réacteur PWR et pour lequel le rejet se situe, en plein accord avec les autorités de sûreté, à la moitié environ de la limite très prudente autorisée.

F. Certifications et audits

Globalement, les unités de Tihange et Doel sont entrées dans des processus d'amélioration continue de la qualité de la gestion et de la protection de l'environnement. Les centrales nucléaires vont au-delà des prescriptions légales en matière d'environnement et de qualité.

Ainsi, outre qu'ils étaient déjà ISO 9000, les deux sites sont, et depuis 1997 pour Doel et depuis 2000 pour Tihange, certifiés ISO 14001. Ils sont enregistrés, depuis 1997 pour Doel et depuis 2001 pour Tihange, comme conformes au règlement EMAS. Ces labels d'excellence – l'un international, l'autre européen – sont octroyés aux organisations qui s'engagent volontairement dans l'amélioration continue et dans la diffusion de leurs

performances environnementales. Par cet engagement dans ces systèmes complémentaires, les sites se sont dotés d'un outil global de gestion reconnu. Il permet de mieux maîtriser les risques environnementaux, la gestion des non-conformités et la prévention des situations d'urgence.

Doel (2002) et Tihange (2005) sont également certifiés OHSAS 18 001. Cette certification est une étape dans l'amélioration continue en matière de sécurité et de santé. Elle repose sur plusieurs éléments : une déclaration de politique, des objectifs annuels, une analyse initiale des risques et la mise en œuvre d'un plan d'actions pour l'amélioration du processus.

Les unités ont également sollicité de nombreuses inspections d'experts WANO (*World Association of Nuclear Operators*) pour des « *Peer Reviews* ». À plusieurs reprises, des équipes internationales d'exploitants de différentes centrales nucléaires étrangères ont ainsi évalué les prestations des centrales belges dans des domaines clés comme l'organisation, l'exploitation, la maintenance et la radioprotection. Au moment où cet ouvrage était mis sous presse, le site de Tihange préparait le premier audit OSART (*Operational Safety Review Team*) qui allait se dérouler en Belgique en 2007 à la demande des autorités belges. Les audits de sûreté OSART, menés sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie atomique, sont réalisés sur la base d'un référentiel intégrant les meilleures pratiques internationales (*Best Practices*).

G. L'utilisation des combustibles issus du retraitement s'est déroulée normalement

C'est en mars 1995, sur l'unité de Tihange 2 qu'a eu lieu le premier chargement de huit assemblages de MOX (*Mixed OXyde*). En plus de 415 kg d'uranium frais, un assemblage MOX contient à peu près 35 kg de plutonium provenant du retraitement de combustible usé.

Les assemblages MOX résultant du recyclage du plutonium récupéré lors du retraitement des combustibles usés ont ainsi été chargés lors de 5 rechargements de cœur à Tihange 2 et 12 autres à Doel 3. À chaque fois, à Doel 3, 8 assemblages MOX étaient associés à 36 assemblages de combustible « standard », tandis qu'à Tihange 2, les recharges comprenaient en moyenne 56 assemblages dont 8 ou 12 assemblages MOX. Tihange 2 et Doel 3, avaient été sélectionnées pour pouvoir bénéficier des retours d'expérience d'électricité de France, qui avait mis en œuvre avec succès l'utilisation de combustible MOX. Tihange 2 et Doel 3 sont effectivement de conception Framatome.

Ce sont ainsi 144 assemblages MOX (pour un total de 66 t) qui ont été utilisés en une dizaine d'années. Ils contenaient les 4,8 t de plutonium résultant du contrat de retraitement de 530 t de combustible usé, contrat

que Synatom avait conclu avec Cogema en 1978. Le dernier chargement a été réalisé à Doel 3 en 2006.

En parallèle, à partir de 1994, neuf recharges constituées d'uranium de retraitement, physiquement réenrichi par Synatom auprès d'Urenco, étaient introduites dans la centrale de Doel 1. Cette centrale a ainsi été amenée à fonctionner entièrement pendant plusieurs années au départ de cette seule matière jusqu'à épuisement du stock d'uranium de retraitement issu des contrats Synatom, démontrant le bien fondé de ce recyclage.

Le rapport d'exploitation est très simple : il n'y a jamais eu le moindre incident et pas le moindre assemblage « fuitard ». Tout avait été fait pour que cette exploitation n'ait aucun impact sur la conduite normale et sûre des centrales.

H. La question des provisions nucléaires

La problématique des provisions nucléaires relève à la fois de l'exploitation des centrales et du cycle du combustible

L'industrie nucléaire, plus particulièrement celle liée à la production d'électricité, est une filière industrielle soumise à l'obligation légale d'intégrer, dès la conception des installations, l'ensemble de ses coûts actuels et futurs. Autrement dit, les producteurs d'électricité sont de longue date appelés à constituer des provisions pour couvrir les charges futures (démontage des usines, dépollution, assainissement, décontamination, gestion de déchets, etc.).

Au fil des années, ils l'ont fait en intégrant au prix du kWh une soulte, mise de côté et constituant ainsi une réserve qui représentait 4,5 milliards d'euros au 31 décembre 2006. À terme, ces sommes doivent couvrir les coûts de deux opérations : le démantèlement des centrales et la gestion des matières fissiles irradiées. Pour le premier volet, il s'agit de couvrir les frais liés à la mise à l'arrêt des réacteurs des centrales nucléaires, au déchargement de leur combustible nucléaire, au démantèlement de l'installation et à l'assainissement du site. Pour le second, volet, il s'agit de couvrir les coûts liés à la gestion des matières fissiles irradiées dans les centrales nucléaires.

La perception a changé dans un monde où le risque est plus grand

Tant que le secteur de l'électricité était complètement régulé, les autorités publiques ont admis que ces provisions pouvaient être simplement constituées dans les comptes des sociétés concernées qui, finalement, n'étaient plus que deux, Electrabel et SPE.

Néanmoins, dès le début des années 2000, la perception a évolué. Une question s'est posée avec un peu plus d'acuité : était-on bien certain de pouvoir disposer au moment venu des sommes provisionnées ? Cette légitime interrogation résultait notamment de la fin de la régulation complète du secteur de l'électricité. Electrabel, société privée à capitaux notamment étrangers, est désormais active à l'échelon international et évolue dans un secteur à risque.

Une note au Conseil des ministres du 7 décembre 2001 résumait bien cette préoccupation : « L'enjeu est donc d'obtenir les garanties nécessaires de la part du secteur de l'électricité afin que le coût du démantèlement ultérieur des centrales nucléaires ne soit pas répercuté sur la société (NDLR : ici, dans le sens de « société civile ») en raison d'une indisponibilité des provisions due par exemple à une faillite. » Dans cette optique, des dispositions légales spécifiques ont été prises. Le 11 avril 2003, le législateur a mis en place un ensemble de mécanismes permettant de garantir cette disponibilité.

Synatom a été transformée en Société de provisionnement nucléaire et porte désormais seule la responsabilité d'assurer la couverture des coûts de démantèlement et des coûts liés à la gestion du combustible. Synatom étant une société privée dont le capital est détenu à 100% par Electrabel (mais avec « *golden share* » de l'État belge et deux représentants du Gouvernement dans son conseil d'administration), un Comité de suivi a été institué et chargé de surveiller le processus de constitution des provisions et la gestion des fonds correspondants.

Synatom est responsable de la couverture des coûts de démantèlement

Depuis l'adoption de la loi, les choses sont allées bon train. Une procédure fixant les modalités de constitution des provisions et déterminant des critères d'évaluation a été validée par le Comité de suivi. Les provisions déjà existantes chez Electrabel et SPE ont été transférées chez Synatom. Des mécanismes et critères clairs permettent que l'argent soit prêté à 75 % à Electrabel et SPE. Au moins 25 % doit être placé dans des actifs extérieurs aux exploitants nucléaires. En cas de faillite des exploitants, le mécanisme mis en place par le législateur assure que la provision entière sera disponible chez Synatom, Société de provisionnement nucléaire.

À noter que la loi du 11 avril est également très claire pour le cas où les provisions seraient insuffisantes : « Si, au cours des opérations de démantèlement, les provisions s'avèrent être inférieures au coût de démantèlement, les exploitants nucléaires verseront à la société de provisionnement nucléaire le montant nécessaire pour couvrir l'excédent de coûts de démantèlement au moment où celui-ci est dû ». Le dossier des

provisions nucléaires a ainsi été positivement solutionné suite au dialogue constructif entre autorités fédérales et exploitants nucléaires.

IV. Une gestion maîtrisée du combustible

Depuis le début des années 1980, les électriciens belges appliquent une politique systématique en matière d'approvisionnement à long terme en uranium naturel et de services de conversion et d'enrichissement. L'objectif est de sécuriser leurs approvisionnements et stabiliser leurs coûts. Synatom a développé et maintenu dans le temps une stratégie de diversification de ses fournisseurs.

En effet, si, dans le monde, la production minière reste raisonnablement diversifiée (huit producteurs se partageaient 80 % de la production mondiale en 2004), dans la conversion, l'enrichissement et la fabrication des assemblages, les acteurs sont très peu nombreux. Ils se comptent sur les doigts d'une main. Autrement dit, Synatom doit presque être client de chacun d'entre eux, pour éviter d'être otage de ses fournisseurs.

A. Au milieu des années 1990, les prix de l'uranium se sont effondrés

Synatom couvre les besoins des centrales nucléaires belges principalement par des contrats à long terme et des stocks essentiellement en ligne avec les recommandations d'Euratom (2 ans). La pertinence de cette volonté d'agir dans le long terme et d'ainsi renforcer la sécurité de l'approvisionnement est validée par le fait que, d'année en année depuis 20 ans, les prix d'approvisionnement obtenus par Synatom sont en dessous des prix moyens obtenus par ses confrères en Europe et publiés par Euratom. Durant les périodes d'effondrement des prix, Synatom a poursuivi une politique constante de révision et de renouvellement des contrats à long terme, qui lui a permis de ne pas souffrir des hausses conjoncturelles.

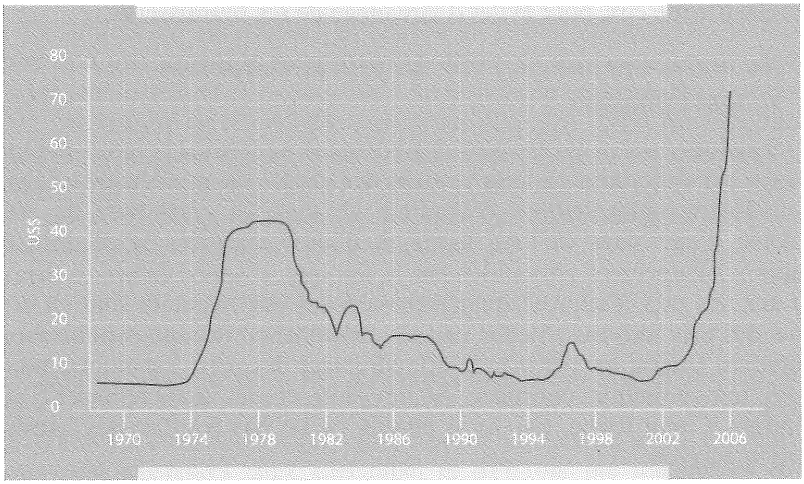
Le résultat est d'autant plus appréciable qu'en ce qui concerne la gestion du cycle du combustible, la période des quinze dernières années s'est révélée particulièrement agitée et instable. La chute du Mur de Berlin en fin d'année 1989 a abouti rapidement à celle du régime soviétique, redistribuant de nombreuses cartes, en matière d'uranium comme en bien d'autres. Or la Russie, du temps de la guerre froide, avait accumulé d'énormes quantités d'uranium naturel et enrichi.

D'abord via des traders, ensuite dans le respect d'un accord de démantèlement des armes nucléaires avec les États-Unis, les Russes ont remis sur un marché déjà excédentaire ces volumes importants d'uranium naturel et d'uranium faiblement enrichi. Notamment, environ 20 000 ogives nucléaires devaient ainsi détruites pour produire quelque 500 t d'uranium

militaire hautement enrichi. Désenrichi, ce volume représente à lui seul l'équivalent de 15 % de la consommation occidentale pendant 18 ans, soit jusque 2013.

Dans la foulée, de nouvelles réserves très importantes et très riches ayant également été développées au Canada, le cours de l'uranium – qui est communément exprimé en dollars par livre – s'est effondré. Les prix spot avaient atteint des sommets de 40 dollars la livre lors du second choc pétrolier en 1978, ce qui, exprimé en dollars 2006, représente près de 120 dollars la livre. Ensuite, le cours est retombé à une vingtaine de dollars la livre dans le milieu des années 1980 et 8 dollars en 1992-1993. Avec quelques variations, ce cours s'est maintenu autour des dix dollars la livre jusque 2003.

Figure 1 : Évolution du prix de l'uranium (marché spot, en US $/lb U308)



B. Des incidents conjoncturels ont fait remonter les cours de l'uranium en 2003

Plus récemment, une tension nouvelle s'est exprimée sur les cours de l'uranium. Une série d'événements conjoncturels a suscité l'effet d'une pénurie tirant les cotations vers les niveaux les plus hauts : incendie dans une mine australienne en 2002, inondation dans une mine canadienne en 2003, accident dans une usine de conversion, annulation par le Gouvernement russe d'un contrat de commercialisation d'uranium provenant du démantèlement militaire.

L'impact de cette pénurie relative a été accru par le fait que beaucoup d'électriciens américains ne constituaient guère de stocks d'uranium et fonctionnaient pour certains quasiment en flux tendu. De plus, pour la première fois dans l'histoire de l'uranium, des entreprises boursières sont entrées massivement en jeu en vue de spéculer. Si bien qu'au 31 décembre 2006, le prix de la livre d'uranium était remonté à son niveau le plus haut, soit 72 dollars la livre, comme lors de la seconde crise pétrolière.

Ces tensions nouvelles sur les prix ont donné un coup de fouet à la recherche géologique d'uranium. À terme, elle permettra un redéveloppement de la production minière pour prendre le relais des fournitures d'uranium d'origine militaire. La disponibilité de ces nouvelles réserves devrait tomber à point au milieu de la décennie prochaine pour compenser la fin des contrats russes et la relance attendue de programmes nucléaires civils.

C. L'enrichissement évolue également

L'enrichissement de l'uranium est une transformation nécessaire, coûteuse, et très complexe, pratiquée par un très petit nombre de sociétés dans le monde. Synatom assure sa mission par une participation de 11 % dans le capital de l'enrichisseur Eurodif et par des contrats diversifiés auprès des quelques autres sociétés.

Ces quinze dernières années ont vu de profonds changements. Le procédé d'enrichissement par centrifugation a confirmé sa fiabilité et son économie. Il consomme vingt à cinquante fois moins d'électricité que l'enrichissement par diffusion gazeuse. Les deux installations d'enrichissement par diffusion gazeuse (dont Eurodif) seront remplacées dans les cinq à dix prochaines années par des installations d'enrichissement par centrifugation. Par ailleurs, après avoir connu des hauts et des bas, les perspectives de l'enrichissement par laser redeviennent favorables et pourraient conduire à une application commerciale dès le milieu de la prochaine décennie.

Dans l'ensemble, si la situation se caractérise par un marché d'oligopole, sujet à des contraintes protectionnistes, Synatom est assuré d'un approvisionnement stable via sa participation en Eurodif et son portefeuille de contrats à long terme. Les nouveaux développements devraient permettre au coût de l'enrichissement de rester stable ou de baisser à terme.

D. Retraitement et non-retraitement sont traités sur un pied d'égalité

En matière de cycle du combustible, l'année 1993 a été marquée en Belgique par un débat public de grande envergure, celui concernant le MOX (*Mixed Oxyde*). Pour bien le comprendre, une explication technique préalable s'impose.

Durant son utilisation en centrale nucléaire, le combustible subit une modification. À son déchargement du cœur, après trois ou quatre ans de production d'électricité, l'assemblage de combustible est d'abord refroidi dans des piscines prévues à cet effet. La radioactivité décroît durant cette période. Très tôt, dans le cycle industriel du combustible, s'est posée la question de la meilleure voie à suivre ensuite pour gérer ces assemblages au terme de leur utilisation.

Deux filières sont ouvertes. Soit les assemblages sont conservés en l'état sous surveillance pendant au moins cinquante ans. Il est prévu qu'ils soient ensuite conditionnés et évacués selon le mode d'évacuation géologique définitif qui sera retenu pour les déchets radioactifs. Soit les assemblages sont recyclés selon des technologies désormais éprouvées : c'est la voie du retraitement.

Retraiter le combustible usé, ce qui constitue la première étape du recyclage, c'est lui faire subir une opération industrielle (procédé chimique) qui permet d'isoler les matières encore utilisables ou valorisables, soit 97 % du combustible (96 % sont constitués d'uranium et 1 % de plutonium). Le solde de 3 % est constitué de matières non réutilisables. Les 97 % récupérés peuvent être réinjectés dans le cycle, par conversion et enrichissement pour l'uranium ou par mélange avec de l'uranium pour le plutonium récupéré, avant recyclage dans de nouveaux assemblages et donc servir à nouveau dans une campagne de production d'électricité. Ce sont alors des assemblages à uranium réenrichi et des assemblages MOX (*Mixed Oxide* : $UO_2 + PuO_2$).

Comme beaucoup de leurs collègues étrangers, les électriciens belges s'étaient engagés au milieu des années 1970 dans la filière du retraitement du combustible. Synatom, dans une procédure de coopération avec d'autres pays, avait signé trois contrats de retraitement avec Cogema (Compagnie générale des matières nucléaires) pour 40 t de combustible usé (signé en 1976), 100 t de combustible usé (signé en 1978) et 530 t de combustible usé (signé en 1978). La démarche était parfaitement cohérente, d'ailleurs menée en parfait accord avec les autorités fédérales.

E. Le Gouvernement a laissé poursuivre les contrats déjà engagés

Comme dit auparavant, jusque dans les années 1980, le prix de l'uranium était élevé et, de plus, était en cours le développement de réacteurs surgénérateurs dont la particularité est de produire plus de matière fissile qu'ils n'en consomment.

Au début des années 1990, pourtant, la pertinence de la filière des réacteurs rapides est remise en cause. Les cours de l'uranium se sont effondrés pour les motifs évoqués auparavant. La filière des surgénérateurs est

abandonnée temporairement. Le contexte a complètement changé. Un débat démocratique s'engage au Parlement en 1993 sur la gestion du combustible nucléaire usé. Le Gouvernement, sur la base des recommandations du Parlement, va adopter la solution qui semble pertinente dans ce contexte.

Tout d'abord, il autorise le recyclage de plutonium dans les centrales nucléaires belges à concurrence de 4,8 t. En clair, cela signifie que les électriciens belges peuvent mener à leur terme les contrats de 1978. Ils ont ainsi échappé aux indemnités de rupture. Depuis, ils ont récupéré d'une part l'uranium réutilisable et d'autre part le plutonium qu'ils ont entièrement recyclés sous la forme respectivement de combustible « standard » et de combustible MOX dans les centrales nucléaires belges (cette exploitation se poursuit sans connaître le moindre hiatus, voir le chapitre consacré à l'exploitation).

Ensuite, le Gouvernement a décrété un moratoire sur l'exécution d'un nouveau contrat de retraitement conclu en 1991. Il demandait que les deux filières – d'une part le recyclage et d'autre part l'évacuation des combustibles sans retraitement préalable – soient examinées en profondeur. L'évaluation devait faire l'objet d'un nouveau débat en 1998, qui n'a pourtant débouché sur aucune décision, mis à part celle de demander à Synatom la résiliation du contrat de retraitement qu'elle avait conclu en 1991. Si bien que, de facto, en 2006, la situation est inchangée et la Belgique considère les deux options comme toujours ouvertes.

Ayant exploité jusqu'à leur terme les différentes étapes de la filière MOX, les électriciens belges ont ainsi accumulé un savoir-faire qui pourrait s'avérer précieux au cas où l'option de retraitement reviendrait un jour sous les feux de l'actualité.

Enfin, il faut noter que la décision de 1993 a eu une conséquence particulière, à savoir qu'il a fallu construire de nouvelles infrastructures de stockage temporaire pour les combustibles usés. À Doel, un système de conteneurs de stockage à sec a été retenu. Le SCG (Splijtstof Container Gebouw – Bâtiment de stockage de conteneurs) a été mis en service en 1995. À Tihange, le bâtiment DE (« Extension » du bâtiment existant « D ») a été mis en service en 1997. Il s'agit d'un bâtiment bunkérisé contenant des piscines pour le stockage sous eau.

Ces stockages temporaires présentent une capacité et une flexibilité telles qu'ils sont aussi bien adaptés au scénario « retraitement » s'il devait être réactivé qu'au scénario entreposage temporaire avant évacuation.

F. Le retour des déchets vitrifiés de La Hague se déroule dans la sécurité

Comme expliqué précédemment, la filière du retraitement des combustibles usés produit 3 % de déchets non recyclables, la partie la plus importante (97 %) étant composée d'uranium et de plutonium, recyclables après diverses opérations dans de nouveaux assemblages de combustible dits MOX.

La Belgique avait choisi d'adhérer à un projet de retraitement international. Cette association a permis de fédérer les moyens pour investir dans les outils les plus performants. Cette primauté technologique est par exemple illustrée par la réduction drastique des volumes de déchets à des niveaux beaucoup moins importants qu'initialement prévu, notamment par la mise au point d'une installation de compactage.

Grâce aux optimisations mises en œuvre par Cogema – La Hague (devenue entre-temps Areva), les estimations prévoient le retour en Belgique d'environ 320 m^3 de déchets : 69,8 m^3 de déchets vitrifiés, 126 m^3 de déchets compactés (constitués par les structures des assemblages et équipements liés à l'usine de retraitement) et 206,6 m^3 d'effluents liquides (liés au procédé chimique) conditionnés dans du bitume.

Le rapatriement des deux dernières catégories de déchets ne commencera pas avant 2009. En mars 2007, seul le retour des 69,8 m^3 de déchets vitrifiés était largement entamé, leur fin étant programmée en 2007, après 14 transports réalisés sous le strict contrôle des autorités belges.

G. L'ONDRAF se charge du stockage des déchets remis par Synatom

Les déchets qui sont vitrifiés, s'ils ne sont pas les plus volumineux, représentent néanmoins 99 % de l'activité qui était initialement contenue dans le combustible usé (et engendrée par la production électrique par fission nucléaire). L'opération chimique de retraitement génère des solutions de produits de fission. Celles-ci sont calcinées et incorporées à haute température dans un verre spécial puis coulées dans des conteneurs en acier inoxydable qui sont ensuite hermétiquement fermés par soudage. Les produits de fission ainsi vitrifiés ne peuvent donc se répandre dans l'environnement, ni sous forme gazeuse, ni liquide, ni même de particules. Le conteneur dans lequel les déchets vitrifiés sont coulés est un cylindre en acier inoxydable de 1,34 mètre de hauteur et de 43 cm de diamètre, contenant 150 litres (environ 400 kg) de verre solidifié auquel sont mélangés les déchets radioactifs correspondant au retraitement d'environ 1,6 t de combustible usé.

Les autorités belges, représentées par l'ONDRAF, ont approuvé les spécifications du processus de fabrication. De leur côté, les clients de Cogema, dont Synatom pour la Belgique, ont fait appel à un organisme indépendant qui certifie que chaque client récupère précisément l'activité correspondant aux matières radioactives qu'il a livrées à l'usine de retraitement. À tous les stades de production, tant Synatom que l'ONDRAF vérifient les déchets à rapatrier et participent à l'élaboration des spécifications et dossiers techniques.

Ils vérifient la conformité des déchets avant leur retour en Belgique. En outre, l'ONDRAF inspecte, une nouvelle fois les conteneurs de déchets à leur arrivée, avant de les prendre définitivement en charge (voir à ce propos, le chapitre de cet ouvrage réalisé par l'ONDRAF).

Quant au transport proprement dit, il est réalisé dans le respect de toutes les autorisations requises des autorités françaises et belges. Ces transports de déchets radioactifs constituent une étape normale dans le cycle du combustible nucléaire. Le transport des matières nucléaires obéit à une réglementation stricte et rigoureusement appliquée pour les matières dangereuses et plus particulièrement pour les matières radioactives.

En outre, les recommandations de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) sont appliquées par chacune des autorités nationales et reposent en tout premier lieu sur l'intégrité de l'emballage de transport qui garantit la sûreté. L'emballage de transport TN 28 VT, conçu par Cogema Logistics (maintenant dénommée Transnucléaire International) et agréé par les autorités de sûreté, a subi une série de tests très contraignants (tests AIEA) permettant de vérifier sa résistance (y compris les crash tests lors du transport ferroviaire et routier) et de garantir sa sûreté.

V. Le nucléaire garde sa place

L'opinion publique, qui à une époque s'est montrée très hostile au nucléaire, est en train d'évoluer. Le débat sur le nucléaire se voit désormais remis dans une perspective plus générale. Une priorité actuelle est la lutte contre l'effet de serre. Vu le contexte géopolitique, la sécurité d'approvisionnement de l'Europe en énergie en est une autre.

A. L'opinion évolue de façon favorable au nucléaire

L'opinion évolue, alors que, vingt ans après, Tchernobyl est resté unique comme accident nucléaire d'envergure. Elle reconsidère, ainsi d'ailleurs que certains experts, sa perception. Le réchauffement climatique dû aux activités humaines est devenu une réalité que l'opinion publique appréhende de mieux en mieux. À ce titre, le nucléaire présente des avantages environnementaux patents puisqu'il ne génère quasiment

pas d'émissions gazeuses et ne contribue donc pratiquement pas à l'effet de serre.

Ainsi, en 2002, lors du débat parlementaire belge qui allait aboutir à l'adoption de la loi de *phase out*, Electrabel avait commandité TNS Dimarso pour réaliser une enquête auprès du public. À cette occasion, l'opinion avait tout d'abord montré son peu d'intérêt pour le dossier puisque, spontanément, seulement 4 % des personnes sondées répondaient « l'arrêt du nucléaire », quand on leur demandait de citer une décision gouvernementale importante.

Les questions montraient à la fois le peu d'implication personnelle (75 % pensaient qu'il serait difficile de réduire la consommation électrique) et une méconnaissance certaine des réalités scientifiques (63 % pensaient que le renouvelable pouvait compenser l'arrêt du nucléaire ; 42 % disaient que l'arrêt du nucléaire améliorerait la situation en matière de réchauffement de l'atmosphère).

En juin 2006, un sondage montrait l'infléchissement de l'opinion publique en faveur du nucléaire. Il a été réalisé par IPSOS pour le compte de la Région wallonne (DGTRE : Direction générale des technologies, de la recherche et de l'énergie). Globalement, la perception du contexte énergétique est assez fondée : conviction que les changements climatiques auront un effet sur la santé (86 %), certitude que les prix de l'énergie ne baisseront pas (87 %), implication dans les économies d'énergie (86 %). Par rapport au nucléaire, 60 % des wallons sondés s'affirmaient pour le maintien du nucléaire, d'autant que 71 % pensaient qu'un retrait aurait pour conséquence une hausse des prix de l'électricité.

L'opinion semble donc se rapprocher progressivement de l'avis des experts. Celle-ci tient en une formule toute simple : « Le nucléaire n'est pas LA solution mais il n'y a pas de solution sans le nucléaire ».

B. Le nucléaire indispensable pour lutter contre l'effet de serre

La nécessité de limiter les émissions de gaz à effet de serre, dont le CO_2 qui résulte de l'utilisation des combustibles fossiles, n'est plus scientifiquement contestée. Ces émissions anthropiques sont la cause principale du réchauffement climatique et les conséquences de cette modification s'annoncent catastrophiques pour la planète. Les engagements de Kyoto visent pour l'Europe à réduire ses émissions de 8 % à l'échéance 2008-2012 par rapport à l'année référence de 1990 (objectif de 7,5 % pour la Belgique). Un premier bilan montre qu'entre 1990 et 2000, l'Europe a stabilisé ses émissions.

Certes, il faut privilégier les économies d'énergie et les sources d'énergie renouvelables. Mais cela ne suffit pas : l'expérience montre que

les premières ne parviennent pas à juguler la croissance de la consommation d'énergie et que les secondes souffrent de leur caractère aléatoire.

La production nucléaire d'électricité ne génère quasiment pas de gaz à effet de serre, pas plus, d'ailleurs, que d'autres émissions (souffre, poussières, etc.).

Le Livre vert de la Commission européenne constatait en 2001 :

> Les préoccupations relatives au réchauffement climatique ont modifié les perceptions des contraintes de l'approvisionnement énergétique. La question se pose plus particulièrement pour le nucléaire qui permettra d'éviter 312 millions de tonnes d'émissions de CO_2 en 2010 dans l'Union Européenne (7 % de tous les gaz à effet de serre dans l'Union), soit la production d'émissions de CO_2 d'un parc automobile de cent millions d'unités[8].

En Belgique, les émissions de CO_2 liées à la production électrique s'élèvent actuellement à environ 20 millions de tonnes par an. Sans l'énergie nucléaire, elles atteindraient pas moins de 50 millions de tonnes par an, ce qui reviendrait à augmenter de 20 % le total des émissions annuelles nationales tous secteurs confondus, actuellement de l'ordre de 150 millions de t.

C. Les projections du Bureau Fédéral du Plan pour 2030

En début d'année 2004, le Bureau Fédéral du Plan a publié une étude sur les perspectives énergétiques pour la Belgique à l'horizon 2030. L'ouvrage analyse quelle sera l'évolution du paysage énergétique national sur la base du contexte et intégrant donc un retrait progressif du nucléaire échelonné de 2015 à 2025, via une fermeture progressive des unités existantes après 40 ans de vie.

L'étude envisage également des scénarios alternatifs. Parmi ceux-ci, deux intègrent le nucléaire : le premier envisage simplement que les centrales existantes soient exploitées durant 60 ans ; le second ajoute à la poursuite de cette exploitation la mise en activité de nouvelles unités à partir de 2020.

Les résultats sont édifiants. En matière d'électricité, le scénario de base débouche à l'échéance 2020 sur une production assurée pour 75 % par des centrales Turbines Gaz Vapeur. La proportion est un peu contrebalancée en 2030 par les centrales au charbon qui représenteraient 30 % du total. Les énergies renouvelables ne couvriraient que 5 % d'une consommation accrue de 50 % par rapport à aujourd'hui. Le gaz naturel à lui seul couvrirait 40 % des besoins belges en énergie primaire. En ma-

---

[8] Livre vert de la Commission européenne, « Vers une stratégie européenne de sécurité d'approvisionnement énergétique », Office des communications officielles des communautés européennes, p. 37.

tière de CO_2, le constat est également sévère : les émissions dues à la production d'énergie augmenteraient encore plus rapidement que la consommation totale d'énergie. Elles s'accroîtraient de 0,8 % par an entre 2000 et 2030.

Sans surprise et comme l'envisageait déjà la Commission AMPERE, les options nucléaires réduisent très fortement la dépendance du pays au gaz naturel. Tout aussi logiquement, elles permettent de réduire fortement les émissions de CO_2. En prolongeant la durée de vie des centrales nucléaires jusqu'à 60 ans, l'ensemble des émissions de CO_2 diminuerait en 2015 de 15 % par rapport au scénario de base dans lequel la durée de vie des centrales nucléaires est limitée à 40 ans.

D. Il n'y a pas d'alternative au nucléaire qui tienne la route

De plus, la Commission AMPERE l'avait souligné, dans un pays comme la Belgique, le potentiel des énergies renouvelables est limité. Elle l'avait estimé au grand maximum à 10 % de la production totale d'électricité en 2020, pour autant que toutes les ressources y soient consacrées et que, par exemple, toute la biomasse soit utilisée à la production d'électricité, excluant ainsi les biocarburants. La cogénération, elle, ne peut miser que sur un potentiel certainement inférieur à 20 % à la même échéance.

Dans tous les cas, un pays comme la Belgique devrait donc recourir massivement au gaz naturel et au charbon, aggravant ainsi l'impact sur le réchauffement de la planète.

Une centrale nucléaire de 1000 MW fonctionnant en base nécessite par an 20 t de combustible. Pour une prestation identique, il faut 1,6 million de tonnes de pétrole (40 pétroliers), 2,5 millions de tonnes de charbon (2 ou 3 trains par jour) ou 2 milliards de m^3 de gaz naturel (l'équivalent de 30 méthaniers).

Les réserves disponibles des combustibles fossiles sont limitées. Est-il raisonnable de brûler des ressources (gaz et pétrole) qui ont par ailleurs des usages plus nobles ? De plus, la répartition de ces réserves dans des zones géopolitiquement instables met potentiellement en péril l'approvisionnement de l'Europe. Les tensions sur les marchés des hydrocarbures sont déjà très sensibles.

L'uranium est disponible en très grandes quantités bien réparties, notamment dans des pays stables (Canada, États-Unis, Australie, etc.) et les réserves sont estimées à 250 années. De plus, les fluctuations sur les marchés du combustible nucléaire n'affectent que faiblement le coût de l'électricité.

E. Le nucléaire est appelé à produire plus d'électricité demain

Alors que certains pensent que le nucléaire a connu un coup d'arrêt définitif, il faut constater que cette perception est fausse au niveau mondial. Depuis la fin des années 1980, l'électronucléaire s'est développé à peu près au même rythme que la totalité de la production d'électricité dans le monde, soit environ 2,5 % par an (Rapport annuel de l'AIEA, 2003).

Dans ce contexte, il s'avère intéressant de procéder à une relecture des conclusions de la Commission AMPERE : « Il n'y a pas de raison scientifique ou technique qui puisse justifier la mise à l'arrêt d'une centrale nucléaire. [...] Seules des raisons économiques ou des décisions politiques pourraient imposer cette opération ».

En fait, en Belgique, aucune durée de vie n'était mentionnée dans les autorisations d'exploitation pour les centrales nucléaires. Toutefois, les exploitants sont tenus de se soumettre à un examen de sûreté tous les dix ans. Il s'agit d'une révision approfondie, dite décennale, au cours de laquelle les installations sont inspectées et, si nécessaire, adaptées à l'évolution technique, aux normes et prescriptions en vigueur. Les électriciens belges se sont toujours réjouis de ce processus, mené sous le contrôle de l'organisme agréé. Cette révision décennale a largement contribué à l'excellence et aux taux d'utilisation des unités.

Dans le monde, la durée de vie potentielle du parc existant est revue régulièrement à la hausse. Ainsi, au premier septembre 2006, aux États-Unis, la NRC (Commission de la réglementation nucléaire) avait approuvé la prolongation de 20 ans des licences d'exploitation de 44 réacteurs qui pourront ainsi être exploités pendant 60 ans. Une dizaine de demandes étaient en cours d'examen et des lettres d'intention concernaient une vingtaine d'autres exploitants.

F. Sur un marché libéralisé, les électriciens belges sont candidats à de nouvelles centrales

Electrabel et le Groupe SUEZ ont déjà manifesté leur intérêt de contribuer au développement de l'énergie nucléaire, entre autres en construisant et en exploitant un réacteur EPR en France (la première unité de ce type est déjà en construction en Finlande).

L'EPR est un réacteur à eau pressurisée. Sa puissance de 1 600 MW est supérieure à celle des centrales les plus récentes (N4 de Framatome ou Konvoi de Siemens). Son constructeur, AREVA NP résulte de la fusion des activités nucléaires de Framatome et Siemens, entreprises qui ont construit 96 réacteurs nucléaires (un tiers de la puissance mondiale) et accumulé les leçons de plus de 30 années d'exploitation.

PARTIE III

LES APPLICATIONS MÉDICALES

Synthèse

Prof. Janos FRÜHLING

Médecin directeur général honoraire et Chef de service honoraire du Service de médecine nucléaire de l'Institut J. Bordet (ULB), Secrétaire perpétuel de l'Académie royale de médecine de Belgique

Les années 1895 et 1896 ont été marquées par deux découvertes fondamentales, celle des rayons X par K. Röntgen d'une part et celle de la radioactivité naturelle par H. Becquerel d'autre part, toutes deux couronnées par un des tout premiers prix Nobel (1901 et 1903). Les deux découvertes ont eu quasi immédiatement leur application médicale, les rayons X ayant ouvert le chapitre de l'imagerie médicale, devenue en un siècle une science clinique indépendante et présentant une dynamique d'évolution auparavant inimaginable. Le radium très rapidement isolé par Mme M. Curie, un émetteur naturel de radioactivité (« activité nucléaire »), s'est révélé immédiatement comme une arme thérapeutique puissante, notamment vis-à-vis des maladies tumorales. Dans l'esprit du présent livre, nous pourrions dire que les premières applications du radium il y a cent ans environ, ont déjà préfiguré la médecine nucléaire thérapeutique. Toutefois, l'utilisation répandue des différents radionuclides à partir des années 1940 aussi bien en diagnostic qu'en traitement, est devenue possible après la découverte de la fission nucléaire (Hahn et Meitner 1939) qui a permis la production des différents radioisotopes, entre autres à usage médical humain.

Les premières bombes à cobalt utilisant l'émission naturelle gamma du ^{60}Co, sont apparues à l'issue de la Seconde Guerre mondiale et ont constitué un progrès technique majeur de la radiothérapie, permettant de pouvoir irradier en profondeur avec des doses tumoricides, les différents cancers organiques. Ceci était considéré pendant les années 1950 et 1960 comme le prototype de l'usage pacifique du nucléaire en opposition aux bombes A et H. Il est piquant de relever avec quelle ferveur la propagande stalinienne – précurseur des antimondialistes modernes et des antinucléaristes virulents – a chanté les louanges de cette technique nucléaire médicale pacifique entre 1950 et 1970.

Le présent chapitre, consacré à l'usage médical des isotopes radioactifs et de leurs différentes émissions de rayonnements ionisants, offre au lecteur un survol rapide mais approfondi des contributions des différentes branches de la médecine nucléaire. Ainsi, après un chapitre d'introduction générale, les différentes techniques de routine en diagnostic, exercées dans le cadre de la médecine nucléaire clinique, sont décrites avec mention spéciale pour la pathologie thyroïdienne. Ce chapitre est suivi par une évaluation actualisée de la contribution la plus moderne des techniques nucléaires, à savoir du PET-CT qui est devenu depuis dix ans environ, la technique diagnostique de « *golden standard* » en oncologie. Ces chapitres précédents sont logiquement complétés par la description des différentes méthodes thérapeutiques, surtout oncologiques, offertes par l'emploi adéquat des radioisotopes.

L'ensemble de ces différents articles constitue une entité cohérente qui contient peut-être l'argumentation la plus convaincante en faveur de la reconnaissance de l'apport positif du nucléaire dans l'intérêt des sciences médicales et de la santé publique dans son sens large, notion qui n'apparaît que trop rarement dans les débats sociétaux au sujet de l'avenir du nucléaire.

Description générale de la médecine nucléaire

Prof. Janos FRÜHLING et Dr Anne DELCORDE

Médecin directeur général honoraire et Chef de service honoraire du Service de médecine nucléaire de l'Institut J. Bordet (ULB), Secrétaire perpétuel de l'Académie royale de médecine de Belgique

Spécialiste en médecine nucléaire. Chef du Centre de médecine nucléaire, Mettewie

I. Introduction

Le but de ce bref chapitre d'introduction est de définir la médecine nucléaire en tant que technique médicale diagnostique et thérapeutique indépendante et de résumer l'évolution de cette spécialité depuis ses origines jusqu'au début du 21e siècle.

Nous ferons le point sur l'état des lieux de la médecine nucléaire en Belgique en 2000-2005 et esquisserons les voies que cette discipline pourrait emprunter au cours des années à venir.

La médecine nucléaire est une discipline d'imagerie médicale fonctionnelle qui reflète l'état métabolique momentané d'un organe ou d'un système d'organes. Cette spécialité est issue de la découverte de la fusion nucléaire (Hahn, 1938) et de la production des isotopes radioactifs artificiels (Joliot-Curie, 1934) ; elle se base sur le principe de traceurs (Hevesy, 1923) selon lequel chaque isotope radioactif ou chaque molécule contenant un atome émetteur de rayons, se comporte comme l'atome ou la molécule stable sur le plan biochimique et biologique.

II. Résumé de l'histoire de la médecine nucléaire

La première application médicale des radioisotopes date de 1936, lorsque Dougherty et Lawrence ont utilisé le ^{32}P dans un but thérapeutique chez les patients atteints de leucémie. La première application diagnostique des traceurs radioactifs date de 1938 lorsque S. Hertz et coll. ont

publié leur travail intitulé « *Radioactive iodine as an indicator in the study of thyroid physiology* » (*Proc. Society of Experimental Biological Medicine, 1938, Vol. 38, p. 510*)

Depuis lors, l'évolution de la médecine nucléaire peut être subdivisée en plusieurs périodes distinctes.

1940-1945. Le développement de l'utilisation expérimentale dans les sciences fondamentales et en clinique des radioisotopes suit l'évolution du programme « Manhattan ». Le réacteur nucléaire et la bombe atomique amènent les produits de fusion isolés, comme dérivés pacifiques de ce programme : ^{32}P, ^{131}I, ^{132}I. On note d'emblée l'utilisation thérapeutique des radioisotopes en clinique.

1945-1960. Les techniques isotopiques conquièrent l'Europe et déjà très tôt la Belgique. En particulier, la recherche fondamentale emploie massivement le ^{3}H, le ^{14}C et le ^{32}P. Apparaissent différentes techniques d'investigation fonctionnelle (épreuves métaboliques) et morphologique (scintigraphies). La thérapie isotopique maintient sa place. De nombreux isotopes trouvent une application médicale : ^{125}I, ^{131}I, ^{32}P, ^{51}Cr, ^{59}Fe, ^{75}Se... Notamment, les résultats obtenus à l'aide de traceurs radioactifs permettent de reconsidérer fondamentalement nos connaissances des processus biochimiques normaux et pathologiques chez les animaux expérimentaux et chez l'homme.

1960-1970. Période d'extension des techniques nucléaires, en particulier des différentes épreuves intéressant de plus en plus d'organes chez l'homme : cerveau, foie, squelette, etc. L'association ^{99m}Tc – gamma caméra assure à la médecine nucléaire une place privilégiée comme seule technique *in vivo* fonctionnelle, non traumatique, en complément de celles utilisant les rayons X. L'on notera, avec l'introduction du ^{99m}Tc, la naissance de la radiochimie comme branche indépendante. De plus, apparaissent les précurseurs des premières épreuves *in vitro*.

1970-1980. Le rôle morphologique dominant de la médecine nucléaire est entamé à partir de 1975 par l'apparition et l'extension d'une part des appareils d'échographie et d'autre part par l'introduction de la première génération des scanners-RX. Néanmoins, la scintigraphie osseuse et les techniques isotopiques lymphologiques demeurent e.a. dans leurs domaines des techniques de référence.

Les ordinateurs sont introduits massivement en médecine nucléaire de routine clinique entraînant une évolution spectaculaire de techniques fonctionnelles et dynamiques.

Le nucléariste garde sa place centrale dans le diagnostic, le traitement et le suivi de la pathologie thyroïdienne.

Les techniques du dosage *in vitro* connaissent une croissante énorme ; une pionnière de ces techniques R. Yallow reçoit le prix Nobel en 1977.

1980-1990. Diminution lente, excepté pour la scintigraphie osseuse, des techniques morphologiques isotopiques pures. Par contre, évolution explosive de la cardiologie nucléaire devenant une véritable sous-spécialité indépendante, à l'interface de plusieurs spécialités médicales.

Les tomographes RMN apparaissent en routine clinique. La réponse de la médecine nucléaire par rapport à ces challenges est l'introduction des caméras SPECT et des caméras à plusieurs têtes. L'utilisation des caméras à balayage à une ou plusieurs têtes devient la routine dans la plupart des services de médecine nucléaire clinique. L'accident de Tchernobyl met en exergue l'importance des problèmes de radioprotection même en routine clinique quotidienne.

1990-2000. Pendant cette période, l'on observe deux processus parallèles. En imagerie médicale, la RMN morphologique est considérée à plusieurs égards comme la technique de référence en routine clinique tandis que les scanners RX deviennent également plus performants (CT spiralés).

En médecine nucléaire, l'on observe un recul important des techniques nucléaires *in vitro* mais l'essor de la tomographie à positron devient dominant en oncologie pour constituer à la fin de la décennie pour certaines affections le « *golden standard* ».

L'évolution des techniques PET entraîne un développement important de la radiochimie chaude (« *baby-cyclotrons* » à usage hospitalier). Le ^{18}F-FDG s'impose comme le traceur oncologique universel.

En thérapie, les anticorps radio-marqués constituent une méthodologie en voie de développement.

L'avancement de l'unification politique, économique et scientifique de l'espace européen modifie fondamentalement l'exercice des spécialités médicales sur le terrain, médecine nucléaire y compris.

2000-2005. Cette période est la suite logique de la décennie précédente. Les progrès des techniques informatiques constituent l'avance principale enregistrée durant cette période, permettant l'évolution importante des techniques de fusion d'image, représentée par l'apparition massive des appareils de type PET-CT dans les départements de médecine nucléaire de pointe.

Un progrès intellectuel majeur est constitué par le lancement par H. Wagner Jr. de la notion d'« imagerie moléculaire » comme but final et ambitieux pour la médecine nucléaire du futur. Ceci implique le développement continu et harmonieux de toutes les branches scientifiques qui contribuent d'une manière ou d'une autre à l'évolution de la médecine nucléaire.

Ainsi, on peut prévoir une amélioration constante des appareils de détection conjoints, fonctionnels et morphologiques, avec une résolution spatiale et temporelle de plus en plus poussée. La radiochimie chaude deviendra l'une des disciplines clef avec l'élaboration des marqueurs et ligands spécifiques, adaptés physiologiquement aux processus métaboliques à étudier. L'évolution vers l'imagerie moléculaire fonctionnelle peut concerner aussi bien les processus métaboliques pathologiques et normaux que des questions génétiques de biologie moléculaire.

III. La médecine nucléaire belge

Ce qui précède décrit l'évolution de la médecine nucléaire dans les pays développés de l'hémisphère nord, dans le monde anglo-saxon et en Europe continentale.

Mutatis mutandis, tout ceci est valable pour la médecine nucléaire belge qui a suivi la même évolution avec les mêmes caractéristiques entre 1945 et 2005 et, en particulier, pendant la période 1990-2005 qui fait globalement l'objet de cet ouvrage.

Remarquons ici que les premiers médecins belges pratiquant cliniquement la médecine nucléaire provenaient de deux spécialités, à savoir de la Radiothérapie et de la médecine interne – endocrinologie. Citons ici, comme anecdote, que le Professeur A. Claude, futur prix Nobel de médecine en 1974, devenant directeur scientifique de l'Institut Bordet, a créé le laboratoire de Radioisotopes de cette institution, déjà en 1950, ayant envoyé le futur responsable de cette entité à Oak Ridge (Ten. U.S.A.), dans le laboratoire le plus en vue des sciences nucléaires de l'époque, en vue d'acquérir les techniques isotopiques médicales de pointe. On a pu observer la même politique dans la plupart des centres spécialisés universitaires du pays, au nord comme au sud.

L'essor de la médecine nucléaire en Belgique a été rapide et pour la fin des années 1970, le nombre de centres de médecine nucléaire cliniquement actifs dépassait 60, une densité, relative à la population et la superficie du pays, qu'on ne retrouve à cette période qu'en Californie ou sur l'East Coast des États-Unis.

Les médecins nucléaristes cliniquement actifs, tout en étant spécialistes reconnus, soit en radio-radium-thérapie, soit en médecine interne, ont pu exercer les actes de médecine nucléaire et détenir des radioisotopes dans un but diagnostique et thérapeutique par une autorisation spéciale délivrée par le ministère qui avait la Santé publique dans ses attributions. La médecine nucléaire en tant que spécialité autonome fut créée et reconnue en 1985. Remarquons encore que les premiers pionniers et la génération qui les a suivi ont fondé, en 1970, la Société belge de médecine nu-

cléaire, particulièrement active depuis 35 ans et un des moteurs de la future Société européenne de médecine nucléaire.

Malheureusement les données statistiques concernant le nombre de praticiens et de départements de médecine nucléaire en 1990 ne sont pas accessibles. En 2005, dans notre pays, il y avait 144 spécialistes reconnus en médecine nucléaire diagnostique qui ont presté 1 054 403 actes dont le remboursement INAMI s'élève à 60 547 987,61 euros. Soixante-sept collègues avaient la double reconnaissance en médecine nucléaire et radiothérapie. Pendant l'exercice 2005, ils ont presté 526 947 actes, générant un remboursement INAMI de 31 128 640,7 euros. Enfin, 65 médecins sont reconnus comme spécialistes en médecine nucléaire diagnostique et en médecine interne-endocrinologie. L'activité de ce groupe correspond à 805 743 actes, dont le remboursement INAMI s'élève à 22 471 573 euros. (Les auteurs remercient le Dr A. Boisdenghien de l'INAMI, d'avoir mis ces données à leur disposition.).

En 2004, selon le ministère de la Santé publique, 140 sites hospitaliers disposaient d'un service de médecine nucléaire *in vivo* (il existait de plus quelques centres privés dont le nombre ne doit pas dépasser 10). Sur ces 140 sites, 130 services possédaient une ou plusieurs gamma caméras à balayage ou tomographiques. Six services disposaient uniquement d'une gamma caméra planaire.

Selon un récent article de presse quotidienne se basant sur les données ministérielles disponibles, 30 000 examens de type PET ont été réalisés en Belgique en 2005. Vingt et un PET-scanners et PET-CT opérationnels existeraient dans le pays, dont 13 sont autorisés selon les critères de l'arrêté royal de 2000, mais cet arrêté sera vraisemblablement amendé sous peu, notamment sous la pression de la législation européenne sur la concurrence.

L'exercice de la médecine nucléaire en Belgique est encore influencé par deux arrêtés royaux promulgués relativement récemment, dont l'arrêté royal de juillet 2001 qui définit (complètement pour la première fois depuis 1963) toutes les conditions d'utilisation diagnostique et thérapeutique des radioisotopes en médecine nucléaire humaine. Cet arrêté, dont une nouvelle mouture partiellement remodelée est en préparation pour début 2007, est fort complète et s'occupe de tous les volets se rapportant à l'activité de médecine nucléaire. Ainsi les critères de formation ont été clairement définis pour les futurs spécialistes. La place de haute responsabilité pour le radiophysicien a été mise en exergue et les règles de radioprotection hospitalière clairement définies selon la législation européenne en vigueur.

Puisque le colloque singulier entre le médecin spécialiste en médecine nucléaire et son patient est à la base de toute activité dans le cadre de

cette spécialité, la loi du 28 septembre 2002 sur le droit des patients, concerne également l'exercice de la médecine nucléaire en Belgique. Ainsi, entre autre, le spécialiste nucléariste doit en particulier informer son patient, dans un langage compréhensible, des buts de l'examen, des techniques utilisées et des prescriptions de radioprotection. Ces règles sont actuellement d'application obligatoire.

Une troisième mesure administrative légale influencera également l'exercice de la médecine nucléaire, celle imposant actuellement un « *Numerus clausus* » rigoureux (et irréaliste) quant à la formation des spécialistes, particulièrement néfaste pour les spécialités comptant un petit nombre de représentants. Si la situation en vigueur n'est pas amendée au cours les dix à quinze années à venir, le nombre de nucléaristes belges de qualité va inexorablement diminuer et les médecins, ayant bénéficié d'une formation de haut niveau, seront remplacés – libre circulation des travailleurs européens oblige – par les médecins venant d'autres pays de l'Union européenne, dont le niveau de formation et de connaissances ne peut être garanti. Cette situation est hautement défavorable pour la qualité de la médecine nucléaire exercée en Belgique et de ce fait pour les patients.

IV. Conclusions

Nous avons brièvement esquissé en grands traits l'histoire, la nature et la contribution à la santé publique de la médecine nucléaire, « enfant scientifique » commun de la médecine, de la physique et de la chimie. Nous avons présenté la photographie instantanée des structures et de l'état de lieu de cette spécialité en Belgique à la fin de la période 1990-2005.

Trois collègues spécialistes réputés exposeront dans les trois chapitres suivants, en détail, les conditions techniques et les contributions cliniques des trois branches fondamentales de la médecine nucléaire, à savoir : l'usage thérapeutique des radioisotopes, la méthodologie et les résultats cliniques apportés en tomographie à émission des positrons, et la place des techniques isotopiques dites « classiques » dans la pratique médicale clinique, thyroïdologie y comprise.

Il est plus que souhaitable que, se basant sur ces quatre chapitres consacrés à la médecine nucléaire, cette branche, par définition pacifique de l'énergie nucléaire, constituée par l'emploi médical des radioisotopes soit connue par les politiques et par les décideurs de tous bords afin de moduler une politique nucléaire actuellement subjective, démagogique, populiste et myope mettant en danger l'avenir et l'indépendance énergétique du pays avec répercussion indirecte probable sur la santé publique – au sens large.

Techniques classiques de médecine nucléaire

Dr Claudine ALS

Agrégée de l'enseignement supérieur,
Chef de Service de médecine nucléaire,
Clinique Sainte Thérèse, G.D. du Luxembourg

I. Données inchangées

La médecine nucléaire classique en Belgique est une spécialité de haut niveau, qui n'a pas à craindre les comparaisons européennes. La relation complémentaire et positivement compétitive entre médecine nucléaire et radiodiagnostic persiste et continue à évoluer en fonction du progrès technologique. Le nombre élevé de publications scientifiques de médecine nucléaire dans des revues internationales spécialisées témoigne de la vitalité et de l'originalité des travaux de recherche. La Belgique a de ce fait eu l'honneur d'héberger le congrès européen de médecine nucléaire en 1995.

Le radiotraceur de loin le plus utilisé en médecine nucléaire classique est et reste le Technétium-99m, facilement disponible à partir d'un générateur un situ, de courte demi-vie et de faible énergie, donc peu irradiant. Aucun examen de médecine nucléaire *in vivo* ou *in vitro* ne se fait sans décision clinique ni ordonnance signée par le médecin référent. Celui-ci représente le lien incontournable entre patients et médecine nucléaire d'une part ainsi que d'autres techniques d'imagerie médicale d'autre part. Comme les services spécialisés de médecine nucléaire sont établis soit dans un hôpital, soit en cabinet privé en-dehors d'une institution hospitalière, la fréquence relative des différents types d'examens de médecine nucléaire peut varier fortement d'un service à l'autre. Cette fréquence relative dépend de facteurs techniques (équipement, spécialisation de l'hôpital) et humains professionnels (spécialisation des principaux médecins référents ainsi que des médecins nucléaristes). La crédibilité, d'où la demande accrue d'examens dépendent évidemment aussi du degré de

différentiation du rapport médical, d'où du savoir-faire de l'équipe médico-technique et des médecins spécialistes en médecine nucléaire.

II. Évolution générale : ce qui a changé

A. Progrès technologique

L'évolution générale est tributaire aussi bien du progrès technologique de la médecine nucléaire elle-même que de celui des spécialités annexes. L'imagerie médicale en 2005 en général dépend beaucoup plus de la tomographie qu'en 1990. Ainsi, l'approche multidisciplinaire repose de plus en plus sur la comparaison des différentes techniques tomographiques.

En ce qui concerne les progrès de médecine nucléaire, de nouveaux radiotraceurs ont permis l'élaboration d'un spectre élargi d'indications. La tomoscintigraphie (SPECT : *single photon emission computed tomography*), du fait des progrès techniques et ainsi de sa disponibilité accrue, est à la base du plus grand changement et du plus grand impact introduit en médecine nucléaire en Belgique entre 1990 et 2005. Ainsi, le nombre de caméras aptes à une acquisition par SPECT a augmenté d'une façon importante depuis 1990 jusqu'à 2005. En conséquence, le mode d'acquisition en planaire a été quasi complètement abandonné au profit du SPECT en scintigraphie cérébrale et en scintigraphie myocardique perfusionnelle par exemple. Le SPECT est appliqué de plus en plus fréquemment en scintigraphie osseuse, pulmonaire, rénale, entres autres, ce qui en a élargi les indications et le champ d'application. Ainsi par exemple, le bilan de lombalgies aiguës et chroniques a profité de l'évaluation systématique par tomoscintigraphie osseuse par rapport à l'ancien procédé d'acquisition uniquement en scintigraphie planaire. Tout récemment, l'arrivée sur le marché du SPECT-CT – combinaison entre une gammacaméra SPECT et un CT scanner – a ouvert de nouvelles options diagnostiques, surtout en oncologie, neurochirurgie, cardiologie et en orthopédie.

En ce qui concerne les progrès de méthodes diagnostiques alternatives à la médecine nucléaire, par exemple, la disponibilité accrue de l'IRM en permet l'accès plus rapide et pour un plus grand nombre d'entités cliniques. De plus, comme l'échographe est devenu ubiquitaire jusque dans des cabinets médicaux isolés et que sa haute résolution spatiale et le Doppler associé permettent dans de nombreux cas une évaluation instantanée d'organes, certaines décisions cliniques peuvent se prendre maintenant plus facilement lors de la première consultation. La scintigraphie se fait alors moins souvent en première instance.

En ce qui concerne les méthodes de laboratoire *in vitro*, elles ont été progressivement supplantées par le développement de méthodes 'froides' alternatives.

B. Communication

Une tendance se dessine envers une interprétation plus clinique des examens de médecine nucléaire. Ceci rejoint les efforts de l'EANM (Association européenne de médecine nucléaire) en direction de conclusions cliniques, à l'aide d'une terminologie clinique, des examens de médecine nucléaire[1]. Comme la compréhension de la physiopathologie et de la morphopathologie ont grandement évolué grâce au progrès technologique et à l'approche multidisciplinaire des maladies, les conclusions cliniques deviennent de plus en plus nuancées.

En réponse à l'esprit du temps (*Zeitgeist*), la communication avec les patients – de même que dans d'autres spécialités – a évolué dans le sens de l'ouverture : les feuillets d'informations pour patients, la recherche du consentement éclairé, une approche plus humaine du patient tendent à se généraliser. La médecine nucléaire institutionnelle se présente de plus en plus souvent au public sous forme de websites électroniques. La Société belge de médecine nucléaire est présente sous le site www.belnuc.be.

III. Techniques (vitales) pratiquées en urgence

Il s'agit de la recherche d'hémorragie digestive, d'embolie pulmonaire, de pyélonéphrite chez le nourrisson et l'enfant, d'infarctus myocardiaque récent.

La plupart des examens de médecine nucléaire ne se font pas en urgence. Quelques exceptions existent à cette règle générale. Ainsi, la localisation d'un foyer d'hémorragie digestive, en cas de perte de sang par voie anale et d'angiographie négative, continue à se faire par globules rouges autologues radiomarqués au $^{99m}TcO_4$.

IV. Techniques fréquentes

A. Myocarde

La tomoscintigraphie perfusionnelle du ventricule gauche au repos et à l'effort – recherché d'ischémie d'effort avec ou sans protection médicamenteuse ou localisation/extension d'une nécrose – est bien installée. De plus en plus souvent, elle est couplée à un enregistrement par électro-

[1] Als C. et Bischof Delaloye A., *Clinical quality management in telenuclear medicine*, European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging 2007, 34(11), p. 1727-1728.

cardiogramme (ECG), ce qui permet un calcul de la fraction d'éjection et l'évaluation de la cinétique ventriculaire. Grâce au contrôle de qualité par correction d'atténuation électronique, les examens protocolés faussement positifs – surtout au niveau de la paroi postérieure – sont devenus moins fréquents. La sensibilité et la spécificité de l'examen sont meilleures qu'en angio-IRM ou en angio-CT.

B. Thyroïde

La scintigraphie de la thyroïde reste un examen incontournable en vue de préciser la fonctionnalité régionale thyroïdienne du parenchyme extra-nodulaire ainsi que de nodules – à savoir leur nature 'chaude' (hypercaptante ou hyperfonctionnelle), 'tiède' (isocaptante ou isofonctionnelle) ou 'froide' (hypocaptante ou hypofonctionnelle). La stratégie optimale est de pratiquer une scinti- et une échographie combinées et de les interpréter en connaissance de cause de la biologie, de l'anamnèse et de l'examen clinique. Le gain diagnostique le plus important est toutefois obtenu par la réalisation de l'échographie dans le suivi immédiat et en connaissance de cause de la scintigraphie, par le médecin même qui interprète la scintigraphie.

Le suivi d'un nodule chaud au fil des années, de l'état compensé avec euthyroïdie vers la décompensation fonctionnelle progressive avec émergence d'une fruste hyperthyroïdie latente, est possible du point de vue visuel et semi-quantitatif grâce à la mesure de captation thyroïdienne associée à l'image scintigraphique. Un traitement éradicateur par ^{131}I peut être enchaîné à ce moment-là, en vue de prévenir l'émergence de complications systémiques, par exemple cardio-vasculaires.

Un signe d'appel thyroïdien fréquent est la gêne mécanique, voire la douleur au niveau de la loge thyroïdienne. La scintigraphie – en association avec l'échographie et la biologie – reste un élément diagnostique important pour préciser la cause de la douleur mécanique : thyroïdite, autonomie fonctionnelle multi- ou unifocale, nodule kystique, nodule solide. L'épidémiologie de l'autonomie fonctionnelle thyroïdienne dépend ainsi de la réalisation de scintigraphies en cas de plaintes fonctionnelles générales ou de gêne locale. L'expérience montre qu'au cas où – par expertise inadéquate – un bilan insuffisant par échographie seule est réalisé, de nombreuses indications opératoires inutiles sont posées, qui abordent le problème de façon inopportune. En effet, la chirurgie ne résout en général pas le problème de l'autonomie fonctionnelle thyroïdienne ni celui de la thyroïdite.

C. Squelette

Les indications à la scintigraphie osseuse se sont grandement diversifiées suite à l'utilisation fréquente du SPECT pour les questions cliniques orthopédiques et rhumatismales concernant notamment le bassin, les hanches et la colonne, surtout lombaire, ainsi que le crâne. Les bilans scintigraphiques de douleurs ou d'incapacités fonctionnelles en rapport avec des prothèses osseuses, surtout de hanche, sont impensables sans SPECT associé. Ceci ne supprime pas les indications classiques, à savoir la recherche de métastases osseuses, la mise au point de douleurs ostéo-articulaires typiques ou atypiques, les bilans inauguraux ou le suivi de polyarthralgies, la recherche de fractures de fatigue des pieds et des jambes surtout chez des sportifs ou après traumatismes, surtout en cas d'image radiologique non contributive.

D. Tests respiratoires au ^{13}C ou au ^{2}H

Ces tests élégants, non invasifs, simples sont pratiqués de plus en plus routinièrement dans de nombreux services. La recherche semi-quantitative d'une pullulation microbienne par Helicobacter pilori dans l'estomac (*breath test* urée) représente le test le mieux validé et le plus fiable. Comme le résultat est chiffré (x‰), il en résulte une interprétation affirmative versus négative aussi bien qu'une évaluation semi-quantitative, permettant un suivi après traitement. Le *breath test* au lactose permet de dépister une intolérance digestive au lait et à son sucre principal, le lactose. Cette intolérance peut s'installer à tout âge et il semblerait que son incidence soit en cours d'augmentation. D'autres tests respiratoires sont en cours de validation.

V. Techniques de fréquence variable

A. Poumons

La scintigraphie ventilation-perfusion a en quelque sorte perdu sa situation exclusive dans le diagnostic de l'embolie pulmonaire depuis l'apparition du CT scanner spiralé. Toutefois, le manque de spécificité des anomalies observées en CT et donc d'examens faussement protocolés comme positifs, – dans des mains moins expertes – en réduit l'utilité clinique. La préférence donnée soit à la scintigraphie, soit au CT, est ainsi souvent un choix personnel du médecin demandeur.

B. Reins

La fréquence de la scintigraphie dynamique par MAG3-^{99m}Tc ou par Hippuran-^{123}I reste inchangée dans le diagnostic d'une hypertension

nouvellement découverte ou aggravée, d'une mise au point de douleurs des fosses rénales, d'infections urinaires récidivantes, d'hydronéphrose, de reflux vésico-uréthéral suspecté, de rein en fer à cheval ou d'autre anomalie de localisation, ainsi que le suivi post-opératoire après réimplantation urétérale.

C. Cerveau perfusion

La technique d'acquisition planaire a été complètement abandonnée au profit du SPECT, quel que soit le traceur utilisé. Des évaluations régionales semi-quantitatives sont ainsi possibles, permettant un suivi longitudinal. La visualisation des coupes tomographiques permet une comparaison plus aisée avec les coupes de CT ou d'IRM. Les anciens traceurs de la perfusion cérébrale, toujours en utilisation, ont été rejoints par de nouveaux traceurs issus de la recherche technologique, tels que ligands des récepteurs dopaminergiques, etc.

D. Moelle osseuse

Les traceurs sont encore toujours les nanocolloïdes et les macroalbumines marquées au ^{99m}Tc, auxquels se sont ajoutées plus récemment les immunoglobulines mono-ou polyclonales. Les indications sont surtout la recherche d'atteinte métastatique diffuse de la mœlle, avant l'apparition des images typiques en scintigraphie osseuse, le diagnostic de surinfection d'une prothèse articulaire ou d'ostéomyélite.

VI. Techniques nouvelles

Ganglion sentinelle, cerveau DAT-scan, cerveau IBZM, examens par peptides radiomarqués, etc.

VII. Techniques plus rares

Transit gastro-œsophagien, voies biliaires par hepatoiodida, recherche d'infarctus myocardique récent au pyrophosphate-^{99m}Tc, voies lymphatiques.

VIII. Techniques tombées en désuétude : foie statique

Les progrès et la disponibilité de techniques alternatives – échographie, CT-scanner et IRM – ont supplanté l'indication à la scintigraphie statique du foie, qui n'est pour ainsi dire plus pratiquée.

IX. Perspectives

Dans un contexte européen, la médecine nucléaire belge va se redéfinir continuellement à nouveau en vue de rester compétitive et au meilleur service possible du patient. Les progrès technologiques de l'équipement lourd, de l'informatique aussi bien que des radiotraceurs seront des éléments importants dans cette voie. Le SPECT-CT va ainsi se répandre de plus en plus. La médecine nucléaire classique ou traditionnelle reste une spécialité fascinante à cause de sa diversité clinique, à cause de la relation médecin-patient privilégiée ainsi que de l'importance du lien étiologique à faire entre l'anamnèse, l'examen clinique et les images scintigraphiques. Toutefois, la production commerciale du technétium au départ du molybdène dépend d'un monopole mondial potentiellement gênant concernant l'exploitation du molybdène au Canada.

La tomographie d'émission de positons en Belgique

Les années 1990-2005

Dr Serge GOLDMAN

Université libre de Bruxelles, Service de médecine nucléaire et Unité TEP/Cyclotron biomédical, CUB-Hôpital Erasme

I. Introduction

La tomographie d'émission de positons (TEP) mieux connue sous son acronyme anglais PET (ou PET scan), est une technique d'imagerie faisant appel à des radiotraceurs émetteurs de positons. Les bases théoriques qui fondent cette technique ont été posées dès les premiers balbutiements de l'imagerie radioisotopique, à savoir dans les années 1950. C'est en effet à cette époque que M. M. Ter-Pogossian proposa que les émetteurs de positons, isotopes instables d'atomes constitutifs de la matière vivante tels que les atomes d'oxygène, de carbone et d'azote, offraient l'avantage de produire des traceurs dont le comportement dans les tissus serait identique à celui de molécules biochimiques naturelles. À cette époque, aucune méthode de détection n'était encore disponible pour tester ce concept chez un être vivant. Cependant, des expériences pionnières furent réalisées *ex vivo* par autoradiographie, démontrant que l'oxygène-15, un émetteur de positons d'une demi-vie d'environ 2 minutes, permettait d'évaluer la consommation d'oxygène des tissus. Cette démonstration stimula le développement des outils nécessaires à la fabrication des premiers tomographes TEP qui ne furent disponibles qu'au milieu des années 1970. Dès leur apparition, divers travaux furent publiés décrivant l'usage de la TEP pour l'étude *in vivo* de fonctions essentielles du cerveau et du cœur humain. Outre divers développements technologiques touchant au matériel de détection, à l'électronique de transmission du signal et aux moyens informatiques de son traitement, l'émergence de la TEP comme outil inégalable d'imagerie moléculaire a nécessité des études biologiques fondamentales. Ces études animales permirent d'éta-

blir la validité de l'usage de dérivés radioactifs de molécules biologiques pour l'investigation en TEP de multiples processus physiologiques et métaboliques. C'est L. Sokoloff des *National Institutes of Health* (NIH-USA) qui apporta la démonstration qui eut dans ce domaine le plus grand impact et donna à la TEP l'impulsion propice à lui conférer son statut privilégié au sein de l'arsenal diagnostique en médecine. Les études de L. Sokoloff démontrèrent en effet que l'activité neuronale, en *tout point du cerveau*, peut être quantifiée par l'*analyse régionale* de l'incorporation d'un dérivé du glucose, le 2-désoxyglucose, dont le métabolisme est bloqué au stade d'une forme phosphorylée dont l'accumulation est soumise à une stricte régulation locale. La production d'un dérivé du 2-désoxyglucose marqué au ^{18}F ouvrit alors les portes de l'étude en TEP de l'activité cérébrale régionale chez l'homme normal ou malade, au repos ou lors d'activités cérébrales diverses. Ce dérivé fluoré du désoxyglucose s'avéra d'usage très large en clinique humaine. On découvrit rapidement que cette molécule, le ^{18}F-2-fluoro-2-D-desoxyglucose ou FDG, permettait aussi la mise en évidence de la viabilité cellulaire au niveau cardiaque. Peu après, on découvrait que ce même dérivé du glucose permettait la détection de tissus cancéreux dont on sait depuis les années 1920 qu'ils se caractérisent par une consommation largement excessive de glucose. C'est pour cet usage en cancérologie que le FDG est devenu la molécule de très loin la plus utilisée en TEP à travers le monde.

La naissance de la TEP comme outil de recherche biomédicale et comme méthode majeure d'imagerie moléculaire en clinique humaine a nécessité des développements pluridisciplinaires qui ont concerné des domaines aussi divers que :

- la production de radioisotopes émetteurs de positons au moyen de cyclotrons adaptés ;
- la radiochimie de marquage rapide de molécules d'intérêt au moyen de ces isotopes ;
- la mise au point de méthodes de détection des positons émis dans les tissus ;
- la constitution d'images représentatives de la distribution des points d'émission positonique dans le corps ;
- la modélisation mathématique de la cinétique d'apparition des traceurs dans les tissus en vue d'une quantification effective de processus physiologiques ou métaboliques précis ;
- la validation de l'usage des informations produites en TEP pour l'amélioration du diagnostic et du traitement des maladies humaines.

Il s'avère que plusieurs groupes belges ont joué un rôle important dans chacun de ces divers domaines d'un développement qui place aujourd'hui

la TEP parmi les méthodes d'imagerie médicale dont la diffusion connaît la plus forte croissance.

Ce rôle marquant de la Belgique dans l'essor de la TEP est patent lorsque l'on réalise qu'à côté des grandes nations industrielles, *notre pays est le seul qui s'est vu consacrer un chapitre entier* dans une revue de l'« état de la TEP au niveau international » publiée dans un numéro spécial du *Journal of Nuclear Medicine* en avril 1991.

Dès la fin des années 1970, l'Université de Liège (ULg) et la Universiteit Gent (UGent) ouvraient un programme de recherche consacré à la TEP. Au milieu, puis à la fin des années 1980, des programmes semblables se mettaient successivement en place à l'Université catholique de Louvain (UCL), puis à la Vrije Universiteit Brussel (VUB), à la Katholieke Universiteit Leuven (KUL) et à l'Université libre de Bruxelles (ULB). Il est indéniable que cette place prise précocement par la Belgique dans le domaine est liée aux séjours de nombreux chercheurs belges dans les centres prestigieux qui ont fait naître la TEP, que ce soit en Grande-Bretagne au MRC Cyclotron Unit (Hammersmith Hospital, London) ou aux États-Unis à l'University of California, Los Angeles (UCLA), à la Johns Hopkins University (Baltimore), à l'University of Pennsylvania (Philadelphie) et à l'University of Michigan (Ann Arbor). Ces nombreux chercheurs parmi lesquels R. Hustinx, A. Luxen, J. Melin, L. Mortelmans, P. Rigo, B. Sadzot, E. Salmon, T. Vanderborght, et l'auteur de cette revue, ont permis une avancée rapide des programmes initiés dans leurs universités respectives. Grâce à ces contacts personnels, des collaborations ont été nouées avec ces centres étrangers, ouvrant à des centres belges l'accès à des projets collaboratifs de grande envergure et permettant à de nouveaux chercheurs de parfaire leur formation dans des centres de recherche de pointe, pensons en particulier au *Functional Imaging Laboratory* (FIL) de Londres qui a accueilli des scientifiques belges tels que X. De Tiège, P. Maquet, C. Philips, R. Vandenberghe.

Si l'accueil de chercheurs étrangers dans les centres TEP belges ne fut pas un phénomène essentiel pour leur développement, le passage de certains d'entre eux a eu un impact important. C'est ainsi que D. Comar qui avait participé à de glorieux travaux en TEP au Centre Hospitalier Frédéric Joliot à Orsay a donné au Centre de Recherche du Cyclotron (CRC) de l'ULg une impulsion dont témoigne encore aujourd'hui son succès. L'apport des groupes belges aux diverses disciplines constitutives de la TEP mérite certainement le survol qui en sera fait ici. Mais un point doit être souligné avant toute chose concernant l'organisation de la recherche belge en TEP. Ce qui a caractérisé cette organisation est *une volonté d'établir rapidement des collaborations multiples entre les divers centres belges actifs dans le domaine*. Dès le début des années 1990, des réunions régulières eurent lieu entre les responsables des centres TEP

belges afin de présenter leur vision commune aux autorités qui les concernent. Par ailleurs, des projets collaboratifs de divers ordres ont vu le jour entre les centres belges, certains financés sous la forme de Pôles d'attraction interuniversitaires, d'autres par des conventions passées avec le Fonds national de la recherche scientifique (FNRS) ou le Nationaal Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek (NFWO). Il faut souligner ici le rôle crucial du support fourni par le FNRS et le NFWO dans les avancées scientifiques produites en Belgique grâce à la TEP. Ces programmes ont soutenu des travaux consacrés par des publications internationales du plus haut niveau, fruits de collaborations interuniversitaires croisées entre KUL, UCL, ULg et ULB.

II. La TEP en Belgique
Production de radioisotopes et radiochimie

La valeur de la recherche universitaire dans le domaine nucléaire a été à l'origine d'un développement industriel qui a eu un rôle important dans l'expansion de la TEP en Belgique. L'intuition de physiciens de l'UCL que la TEP ouvrait un nouveau champ d'application du cyclotron dans le monde médical a été à la source de la création d'une entreprise, *Ion Beam Applications* (IBA) qui, en retour, a participé à l'implantation de la TEP en Belgique. Le premier cyclotron à usage médical produit par IBA fut installé en 1990 à l'Unité TEP/Cyclotron biomédical de l'ULB, sur le site de l'Hôpital Érasme, où il est toujours en fonctionnement. L'équipement de centres belges en cyclotrons produits par IBA s'est poursuivi dans l'ensemble des universités belges. Parallèlement à la production de cyclotrons, l'installation et le succès d'IBA en Belgique ont eu des répercussions importantes sur l'efflorescence dans notre pays de compétences particulières en radiochimie des composés utilisables en TEP. Ceci a eu des conséquences dans le domaine scientifique et industriel. De nombreux radiotraceurs originaux ont été décrits par des groupes radiochimiques belges travaillant dans les cinq grands centres universitaires. Parmi ces nouveaux traceurs, citons, des traceurs des systèmes de neurotransmission aminergiques, des acides aminés fluorés divers, des dérivés anti-viraux utilisables dans le domaine de la thérapie génique, des traceurs de l'oxygénation tissulaire. Ces divers traceurs ont été obtenus grâce à de nouvelles méthodes de marquage mises au point dans ces divers laboratoires et largement publiées dans les revues concernées. Dans le domaine industriel, les compétences en ingénierie et radiochimie automatisée ont mené, dans le cadre d'une collaboration entre l'ULB, l'ULg et une jeune société (Coïncidence s.a., reprise depuis par un grand groupe international) à la mise sur le marché du module de synthèse de FDG le plus diffusé dans le monde.

III. La TEP en Belgique
Détection de l'émission de positons
Constitution d'images et quantification du signal

La détection de l'émission positonique fait appel à un principe physique qui confère à la TEP des qualités de sensibilité et de résolution spatiale supérieures à celles des autres méthodes d'imagerie radioisotopique. Le principe de l'imagerie positronique consiste à rechercher l'activation en coïncidence de détecteurs par les photons produits lors de l'annihilation conjointe d'un positon émis dans les tissus et d'un électron constitutif de la matière vivante. L'émission de deux photons d'énergie fixe, suivant un angle de 180°, permet la production d'images qui seront précises, aisément corrigées pour l'atténuation par les tissus traversés et propices à une quantification fiable du signal en chaque point du champ de vision. Les détecteurs utilisés sont généralement placés en anneaux autour du champ de vision et constitués de cristaux associés à un photomultiplicateur et une électronique de mise en coïncidence. Pour améliorer l'efficience de la transduction du signal et réduire les coûts de production des tomographes, des groupes belges ont participé à des projets innovants visant à remplacer les cristaux photosensibles par d'autres systèmes de capture du signal photonique produit. C'est ainsi que le groupe de la VUB a participé à un projet européen visant à la mise au point d'un système de détection innovant faisant appel au principe des chambres à fil. La constitution d'images à partir des signaux détectés en coïncidence a fortement évolué depuis la simple adaptation d'une technique proposée par G.N. Hounsfield, prix Nobel de physiologie et médecine en 1979, pour la production d'images tomographiques en imagerie par rayons X. Des chercheurs belges de l'UCL, la KUL, la UGent et la VUB/ULB ont joué un rôle essentiel dans le passage d'une imagerie tomographique à une imagerie TEP tridimensionnelle, plus sensible et plus en accord avec l'utilisation médicale qui en est faite. D'une production d'images en coupes transversales, par l'analyse de signaux produits au sein d'anneaux de détection isolés par des septa, nous sommes ainsi passés à la production de volumes d'information couvrant le corps entier et utilisant un large ensemble de lignes de coïncidence entre des détecteurs situés au sein d'anneaux proches ou distants. Nos chercheurs ont participé à la mise au point de techniques rapides de production d'images, offrant une qualité supérieure à la technique de rétroprojection filtrée initialement utilisée.

La modélisation mathématique des données cinétiques produites en TEP permet de transformer les taux de comptage mesurés en chaque point de l'image en données quantitatives directement liées à une fonction tissulaire ou une activité métabolique. Le groupe de l'UCL a été parmi les

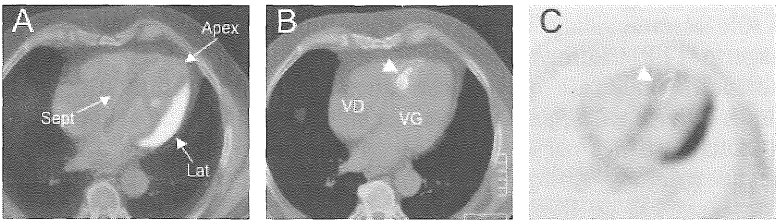
premiers à valider des méthodes adéquates de quantification de variables physiologiques telles que le flux sanguin régional au niveau des parois ventriculaires du cœur. D'autres modèles de quantification ont été proposés par les divers groupes belges de la KUL, de l'ULg, de l'ULB et de la UGent avec l'apparition de nouveaux traceurs destinés à l'étude *in vivo* de processus biochimiques variés.

IV. La TEP en Belgique : utilisation médicale

La TEP a trouvé ses premières applications médicales en neurologie et en cardiologie.

En cardiologie, les groupes de l'UCL, la KUL et l'ULg ont fourni des travaux fondamentaux permettant de définir la valeur de l'investigation de diverses variables physiologiques et métaboliques en TEP pour établir l'état du myocarde soumis à l'agression ischémique. Ces groupes ont étudié chez l'animal et chez l'homme, le flux sanguin régional, le métabolisme glucidique et oxydatif dans diverses situations pathologiques et ils ont fourni les comparaisons nécessaires entre les données ainsi produites et les analyses effectuées *in vivo* par d'autres méthodes d'imagerie fonctionnelle ou *in vitro* par l'examen histopathologique. Plus récemment, le groupe de l'ULB a accompagné l'élaboration de traitements cellulaires de l'infarctus du myocarde en offrant, grâce à la TEP, une imagerie de l'implantation des cellules utilisées au sein des régions traitées.

Figure 1 : Images illustrant la détection de cellules souches administrées dans le réseau des artères coronaires en vue d'une restauration du myocarde détruit par un infarctus



Les images A et B sont des coupes transversales obtenues à travers le thorax en tomographie par rayons X et sur lesquelles sont superposées des coupes tomographiques obtenues en TEP par deux procédés différents. Sur l'image A, l'information TEP est obtenue par injection de fluorodésoxyglucose marqué au fluor-18 (FDG), elle est représentative de l'activité métabolique régionale du myocarde. Sur l'image B, l'information TEP est obtenue par injection de cellules souches marquées au FDG, elle démontre le site d'implantation de cellules souches administrées dans le réseau coronaire.

Sur l'image A, on constate que la région du septum (Sept), qui sépare les ventricules gauche (VG) et droit (VD), présente une activité moindre que la paroi latérale (Lat) du

ventricule gauche, indiquant que les cellules musculaires du septum ont été partiellement détruites. Le métabolisme fortement réduit dans l'apex du cœur (Apex) indique que cette région a subi une nécrose. Sur l'image B, on constate que les cellules injectées se sont implantées dans la partie antérieure du septum (tête de flèche). Sur l'image C, cette implantation dans une zone partiellement détruite par l'infarctus est également illustrée en superposition avec l'image TEP présentée en A.

L'étude du cerveau en TEP a ouvert un champ nouveau de la neurophysiologie et de la physiopathologie des affections du système nerveux. Il s'agit de la cartographie fonctionnelle cérébrale à laquelle d'excellentes revues internationales fondées dans les années 1990 sont consacrées (Human Brain Mapping, Neuroimage). La TEP a permis, par exemple, d'élucider les processus successifs de compensation hémodynamique et métabolique, puis de décompensation ultime, qui caractérisent l'ischémie cérébrale. Les groupes de la UGent et de l'ULg ont participé à cette nouvelle compréhension de la physiopathologie de l'ischémie cérébrale grâce à des travaux précoces en TEP. L'imagerie fonctionnelle fournie par la TEP s'est avérée essentielle pour l'analyse d'affections neurodégénératives, ou apparentées, qui ne s'accompagnent pas de modifications structurelles détectables en imagerie morphologique. Les différents groupes belges, individuellement ou au sein de consortiums européens, ont participé à cette application importante de la TEP en clinique neurologique, en particulier pour différentes formes de démence (Alzheimer, démence frontale, Jakob-Creutzfeldt, etc.), de troubles des mouvements (Parkinson et affections apparentées) et d'épilepsies (épilepsie temporale, dysgénésies et dysplasies corticales, syndrome des pointes-ondes continues du sommeil, etc.). Le groupe de l'UCL a très tôt consacré des études de qualité au fonctionnement cérébral des patients atteints de déficits sensoriels congénitaux ou acquis. Le groupe de l'ULg, en collaboration avec celui de l'ULB, s'est taillé une position dominante dans le domaine de l'étude des fonctions cérébrales résiduelles chez les patients en état de conscience réduite (coma, état végétatif, état de conscience minimale, états induits par l'hypnose ou les agents anesthésiants, etc.). Cette compétence particulière du groupe TEP de l'ULg s'est épanouie en relation avec ses travaux fondamentaux sur la physiologie du sommeil et sur le rôle de celui-ci dans diverses formes d'apprentissage, ici encore en collaboration avec des chercheurs de l'ULB.

Le groupe TEP de la KUL a fait sa réputation dans le domaine de la physiologie cérébrale par des travaux originaux consacrés à la vision. Ces travaux, nombreux et de grande qualité, ont permis d'améliorer notre compréhension des processus associés à l'attention et à la perception visuelle.

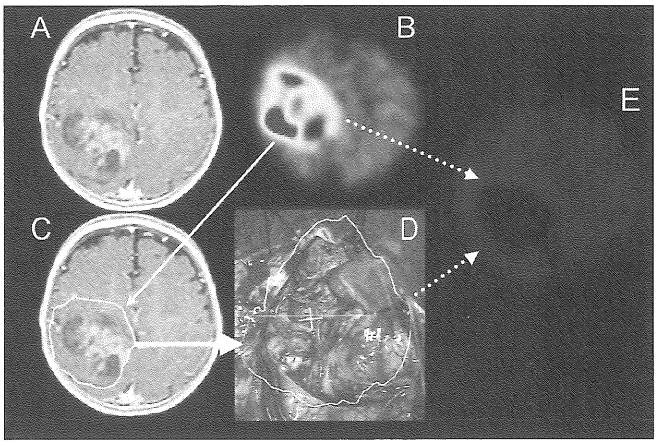
Les troubles mentaux ont formé un champ d'investigation naturel pour l'imagerie fonctionnelle puisque celle-ci constitue un des seuls moyens

disponibles pour objectiver les modifications de fonctionnement cérébral qui y sont associées. Le groupe de l'ULB, en particulier, a mené divers travaux en TEP destinés à la caractérisation des modifications de l'activité cérébrale dans des affections psychiatriques telles que la dépression, la schizophrénie et les troubles du comportement alimentaire.

Le champ d'application le plus vaste qui s'est ouvert à la TEP en clinique humaine fut certainement celui de l'étude métabolique du cancer. La TEP a acquis une place centrale dans l'imagerie des tumeurs. Elle est actuellement très largement utilisée au stade du diagnostic de cancer, lors du bilan d'extension par la recherche de métastases, lors de la recherche de récidives et enfin pour l'évaluation rapide et efficace des traitements anticancéreux appliqués.

Les groupes belges ont largement contribué à cette expansion de l'imagerie TEP en cancérologie. Pratiquement toutes les applications de la TEP reconnues aujourd'hui en cancérologie ont fait l'objet de travaux importants par les différents groupes belges. Très tôt des groupes tels que celui de la KUL, parfois au sein de projets multicentriques internationaux, ont démontré le rôle essentiel de cette méthode d'imagerie dans l'évaluation de cancers tels que ceux du poumon, de l'œsophage et du colon. Le groupe de la KUL a, par exemple, fourni les données princeps qui font aujourd'hui de la TEP la méthode de référence pour la recherche d'une extension médiastinale du cancer du poumon. Le groupe de l'ULg a produit des travaux reconnus sur l'utilisation de la TEP dans le suivi des lymphomes. Les groupes de l'UCL et de la UGent ont particulièrement investi la question de l'utilisation de la TEP comme support au traitement radiothérapeutique des cancers, en particulier pour ceux qui touchent la région tête et cou. Le groupe de l'ULB s'est concentré sur l'utilisation de la TEP dans la prise en charge des patients atteints de tumeurs cérébrales. Il a joué un rôle important dans l'intégration de cette méthode d'imagerie fonctionnelle aux techniques neurochirurgicales modernes apparues au cours des deux dernières décennies. Ce groupe a ainsi décrit l'utilisation de la TEP pour améliorer le ciblage de biopsies cérébrales stéréotaxiques, la résection des tumeurs cérébrales en neuronavigation et leur traitement radiochirurgical ciblé. Il a également démontré la valeur de la TEP pour le suivi du traitement chimiothérapeutique de ces tumeurs.

Figure 2 : Images illustrant le processus de ciblage de la résection d'une tumeur cérébrale par l'imagerie TEP



Une tumeur cérébrale présente une délimitation incertaine sur l'imagerie par résonance magnétique nucléaire présentée sous forme d'une coupe transversale passant par la lésion (**A**). Les contours de la tumeur sont déterminés sur l'ensemble de son volume hypermétabolique en TEP, dont une coupe transversale est présentée (**B**). Le volume de tumeur déterminé sur l'imagerie TEP est transféré sur l'imagerie par résonance magnétique nucléaire (**C**). Ce contour est disponible dans le champ de vision du microscope opératoire et réactualisé en temps réel, afin de permettre une résection tumorale parfaitement ajustée à l'imagerie (**D**). L'imagerie TEP obtenue après l'intervention démontre la disparition complète de toute activité métabolique tumorale (**E**).

V. Conclusion

Nous avons dressé ici un tableau général de l'apport des chercheurs belges au développement de la TEP comme méthode, aujourd'hui irremplaçable, d'imagerie médicale fonctionnelle. Indiscutablement, la Belgique a pris dans ce domaine une place bien supérieure à celle que son positionnement dans le monde industriel et économique aurait permis de présager. Les raisons de ce succès belge sont à rechercher dans la qualité synergique de ses traditions en physique nucléaire, en radiochimie et en médecine clinique.

Offrir un catalogue exhaustif des activités touchant à la TEP en Belgique au cours des vingt dernières années représenterait un travail qui dépasse largement l'ambition de cette présentation. L'objectif de ce panorama de la TEP dans notre pays n'était pas non plus de fournir une liste complète des nombreuses publications scientifiques qui ont eu trait à ce sujet. Pour constater la vigueur de la production scientifique belge dans le domaine, il suffit de mentionner que dans la base de données de la

National Library of Medicine l'usage du seul mot-clé « positron » fournit une liste de 650 occurrences pour des auteurs affiliés en Belgique (http://ncbi.nih.gov/entrez/query.fcgi). Notons que cette liste de publications est loin d'être complète, elle ne comprend pas, par exemple, les articles repris dans la littérature strictement attachée à la radiochimie ou à l'ingénierie. Le choix a été fait dans cette présentation de ne pas faire référence à des études scientifiques spécifiques pour illustrer les travaux des divers groupes cités. Le lecteur intéressé se référera aux auteurs affiliés aux divers centres belges identifiés dans ce texte pour effectuer une recherche bibliographique orientée.

VI. Remerciements

Je remercie les Docteurs Didier Blocklet et Benoît Pirotte, respectivement des Services de médecine nucléaire et de neurochirurgie de l'Hôpital Erasme (ULB), pour avoir fourni les illustrations utilisées. Je remercie le FNRS et la Loterie nationale pour leur support continu aux activités de l'Unité TEP/Cyclotron biomédical de l'ULB.

Utilisation thérapeutique de radioisotopes pendant la période 1990-2005

Patrick FLAMEN et Pierre BOURGEOIS

Professeur et Chef de Service, Service de médecine nucléaire, Institut Bordet. Bruxelles

Professeur et Chef de Clinique, Service de médecine nucléaire, Institut Bordet. Bruxelles

I. Introduction

Ce texte vise à donner un résumé des différents radioisotopes utilisés à visée thérapeutique durant la période 1990-2005. Dans ce type de thérapie, on distingue d'une part les radiopharmaceutiques classiques déjà connus et introduits dans la pratique clinique avant la période considérée, qui continuent d'être utilisés et d'autre part, quelques radiopharmaceutiques importants introduits dans la pratique clinique pendant cette période. Une troisième catégorie concerne les radiopharmaceutiques étudiés exclusivement au sein d'un domaine d'étude clinique spécifique. De cette dernière catégorie, certains entrent (ou vont entrer) dans la pratique clinique quotidienne au bénéfice des malades. Le tableau reprend tous ces radioisotopes et radiopharmaceutiques qui ont été en usage durant cette période avec leurs caractéristiques physiques, leurs indications et leur distribution à travers le paysage hospitalier belge.

II. Les thérapies classiques

Ici sont visées les thérapies par radionucléides qui étaient déjà introduites avant la période considérée. Certaines modalités ont presque entièrement disparu du terrain. D'autres font partie de la panoplie classique de la cancérologie spécialisée en Belgique. Il s'agit des isotopes suivants :

- Iode-131 (^{131}I). Ce radionucléide est classiquement utilisé pour le traitement des cancers thyroïdiens différenciés, des hyperthyroïdies et de certains goitres nodulaires toxiques ou non. Pour le traitement des

cancers thyroïdiens différenciés, deux applications sont distinguées. La première concerne le traitement dit ablatif. Il s'agit d'une thérapie adjuvante, effectuée après une thyroïdectomie (intervention chirurgicale consistant en l'ablation de la glande thyroïde) pour un cancer thyroïdien différencié papillaire ou folliculaire. Le but est avant tout de détruire les résidus de tissu thyroïdien fonctionnel au niveau de la loge thyroïdienne au moyen d'une radiothérapie interne (ablation). Cela permet un suivi plus efficace du patient (basé sur le monitoring du marqueur tumoral de ces cancers, la thyroglobuline, qui est aussi fabriquée par les cellules thyroïdiennes normales) mais aussi d'éliminer les éventuelles cellules tumorales microscopiques résiduelles. Un second groupe d'indications concerne le traitement de patients avec une récidive connue ou une métastase de cancer thyroïdien. La récidive peut se situer à hauteur du cou (récidive locale) ou peut se manifester à une distance (par exemple sous la forme de métastases pulmonaires ou osseuses). Pour ce dernier groupe de patients, des doses plus élevées sont habituellement prescrites (à l'Institut Bordet un maximum de 250 millicuries).

- Iode-131-Meta-Iodo-Benzyl Guanidine (MIBG). Est utilisés pour le traitement des tumeurs neuroectodermales (e.a. le neuroblastome chez l'enfant ; les tumeurs carcinoïdes). Cette thérapie a récemment connu un renouveau suite à la démonstration de son efficacité pour le traitement de patients souffrant de syndromes neuroendocrines. Ces syndromes sont causés par des substances hormonales sécrétées par des tumeurs neuroendocrines (avec e.a. flushing, diarrhée, hypertension). De façon classique, ce syndrome est traité avec des analogues de la somatostatine. Dès que ces derniers deviennent trop laborieux ou inefficaces, un traitement à l'iode 131-MIBG à haut dosage est indiqué.
- Phosphore-32 : pour le traitement de certaines formes de maladie de Vaquez (polycythémie essentielle). Notons que ce traitement n'est plus utilisé que sporadiquement.
- Strontium-89 : pour le traitement des syndromes douloureux causés par des métastases osseuses et résistants aux autres thérapies antalgiques. Il s'agit d'un traitement fort élégant qui peut s'effectuer sur la base ambulante (le patient n'est gardé que quelques heures en observation à l'hôpital, en isolation relative). En dépit de la grande efficacité de ce traitement palliatif, les cliniciens ne le demandent que sporadiquement. Cela est surtout dû à la concurrence d'une série de pharmaceutiques classiques (morphines et morphinomimétiques, biphosphonates) et la crainte (non justifiée) que ce type de thérapies causerait une atteinte importante à la réserve de mœlle osseuse. Cela pourrait exclure le patient d'une étude clinique expérimentale de phase I ou II avec un nouveau médicament antitumoral peut-être effi-

cace. Ce traitement est le plus souvent prescrit aux patients souffrant de cancer de la prostate généralisé.

- Plusieurs formes de colloïdes notamment marqués à l'^{90}Y restent utilisés pour obtenir une radiosynoviorthèse et ce en cas d'arthropathies inflammatoires périphériques évolutives et résistant aux autres traitements préalablement testés. À notre connaissance, seuls quelques traitements ont été administrés ces dernières années en Belgique, en dépit de l'existence de plusieurs études indépendantes provenant de différents centres de recherche qui en ont prouvé l'efficacité. Ainsi, le traitement est utilisé à plus grande échelle dans d'autres pays (e.a. l'Allemagne).

III. Nouvelles thérapies

La période 1990-2005 a vu l'introduction de quelques nouvelles thérapies par radionucléides dans l'arsenal thérapeutique des services de médecine nucléaire, dont certains remboursés par la sécurité sociale.

Le plus important de ce groupe est incontestablement le Samarium 153-HETMP (Lexidronam). Il s'agit d'un biphosphonate couplé au radionucléide ^{153}Sm. Il est indiqué dans le traitement des syndromes douloureux causés par des métastases osseuses et résistants aux autres thérapies antalgiques. Ce radiopharmaceutique est un complément intéressant au traitement au ^{89}Sr décrit ci-dessus.

Certains centres se sont mis à utiliser le Lipiodol marqué à l'^{131}I pour traiter des carcinomes hépato-cellulaires non opérables. Ce radiopharmaceutique est administré en injection intra-artérielle hépatique. Certains centres belges ont développé une expertise remarquable pour ce traitement[1]. L'efficacité de ce traitement, qui est non spécifique du point de vue moléculaire, est basée sur la vascularisation artérielle spécifique des métastases hépatiques par rapport au parenchyme hépatique normal (lequel est pourvu de sang par la circulation portale).

La période considérée dans le cadre de cet article a surtout vu l'utilisation accrue des brachythérapies[2] :

---

1 Lambert B., Van de Wiele C., *Treatment of hepatocellular carcinomas by means of radiopharmaceuticals*, Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging, 2005, 32, p. 980-989; 12) Lambert B., Praet M., Vanlangenhove P., Trosi R., de Hemptinne B., Gemmel F., Van Vlierberghe H., Van de Wiele C., *Radiolabelled lipiodol therapy for hepatocellular carcinoma in patients awaiting liver transplantation : pathology of the explants liver and clinical outcome*, Cancer Biother. Radiopharm., 2005, 20, p. 209-214.

2 Mangold CA., Rijnders A., Georg D., Van Limbergen E., Potter R., Huyskens D., *Quality control in interstitial brachytherapy of the breast using pulsed dose rate ; treatment planning and dose delivery with an ^{192}Ir afterloading system, Radiother.* Oncol., 2001, 5, p. 43-51; Reynaert N., Van Eijkeren M., Taeymans Y., Thierens H., *Do-*

- Les grains d'^{125}I, les capsules de ^{103}Pd, les fils d'Iridium-92 pour le traitement des cancers de la prostate.
- Les sources d'^{192}Ir pour les irradiations des parois vasculaires (prévention de la sténose).
- Les sources d'^{192}Ir pour les irradiations de sites tumoraux primaires (par exemple des carcinomes mammaires).

Bien que l'utilisation de ces sources radioactives soit sous la responsabilité des spécialistes en radiothérapie, leur évocation dans ce cadre nous a paru pertinente.

IV. Thérapies uniquement disponibles dans le cadre de recherches cliniques

Durant la période considérée, plusieurs radiopharmaceutiques à visée thérapeutique ont été étudiés dans le cadre de projets de recherche clinique. Ces traitements n'étaient disponibles que temporairement dans les grands hôpitaux universitaires qui voulaient se positionner à ce sujet.

Certaines de ces thérapies sont entrées récemment ou vont entrer prochainement dans la pratique clinique quotidienne.

Un inventaire :

Plusieurs études scientifiques comportaient l'utilisation thérapeutique d'anticorps radio-marqués dirigés contre l'antigène CD20. Cet antigène est exprimé de façon accrue au niveau de certains sous-types de lymphomes. Les anticorps sont marqués à l'^{131}I (disponible dans le commerce uniquement aux États-Unis, en Europe seulement dans le cadre d'études) ou à l'^{90}Y (radiopharmaceutique récemment disponible mondialement, à usage clinique). Plusieurs études en ont prouvé l'efficacité. Il s'agit d'un traitement fort coûteux. Le prix élevé est d'une part dû à l'isotope même (^{90}Y) et d'autre part au caractère partiellement ou entièrement humanisé de l'anticorps. Depuis peu, le produit est néanmoins remboursé par la sécurité sociale belge, mais seulement dans des indications fort restreintes.

Un deuxième type de thérapies par radionucléides concerne l'utilisation thérapeutique de microsphères marquées à l'Yttrium-90 (Sirsphères) pour le traitement de métastases non opérables de différentes tumeurs (principalement colo-rectales) ou de carcinomes primaires hépato-cellulaires. Le principe de ce traitement est le même que celui décrit ci-dessus pour la thérapie au Lipiodol-131. Le grand avantage de l'utilisation de

---

simetry of ^{192}Ir sources used for endovascular brachytherapy, Phys. Med. Biol., 2001, 46, p. 499-516 ; Nickers P., Thissen B., Jansen N., Deneufbourg JM., *^{192}Ir or ^{125}I prostate brachytherapy as a boost to external beam radiotherapy in locally advanced prostatic cancer : a dosimetric point of view, Radiother.* Oncol., 2006, 78, p. 47-52

l'^{90}Y par rapport à l'^{131}I concerne les mesures de radioprotection nécessaires. Dans le cas de l'^{90}Y, le patient peut déjà quitter l'hôpital le lendemain, sans aucun danger pour son entourage. L'irradiation pour le patient, le personnel soignant et auxiliaire est minimale. En principe, le traitement avec des microsphères marquées à l'^{90}Y est à considérer comme une forme de traitement avec des sources scellées (l'^{90}Y ne quitte pas la microsphère et la microsphère reste bloquée au niveau du foie).

Autres types de thérapies par radionucléides utilisées dans le cadre d'études :

- Le Lipiodol marqué au ^{188}Rh est testé pour des patients souffrant de métastases hépatiques et de carcinomes hépato-cellulaires (UZRUG)[3].
- L'utilisation de colloïdes marqués au ^{32}P pour le traitement local des tumeurs avancées[4].
- L'utilisation du ^{52}Fe pour l'ablation médullaire ou ostéo-médullaire.
- L'utilisation de l'ocréotide marqué à l'^{90}Y pour le traitement des tumeurs qui expriment les récepteurs pour la somatostatine (sous-types 2 et 5). Il s'agit certainement de la nouveauté la plus importante pour l'avenir proche. Plusieurs tumeurs expriment de façon plus ou moins importante les différents sous-types de récepteur à la somatostatine. La thérapie consiste dans l'administration de doses élevées (et souvent à plusieurs reprises) d'octréotides ou d'analogues marqués à l'^{90}Y ou au ^{177}Lu.
- L'HEDP marqué au ^{186}Rh pour le traitement des métastases osseuses douloureuses.

Tableau 1 : Les radioisotopes à utilisation thérapeutique en Belgique durant la période 1990-2005

Forme	Utilisation	Dispersion	Indications
Iode-131 (émetteur gamma et bêta : T1/2 physique : 8,02 jours)			
Na-I	Clinique	Nationale	Hyperthyroïdie
	Clinique	Nationale	Goitres toxiques ou non
	Clinique	Nationale*	Cancers thyroïdiens différenciés
MIBG	Clinique	Nationale*	Tumeurs neuro-endocrines
Lipiodol	Clinique	Nationale*	Carcinomes hépato-cellulaires
Rituximab	Rech.Clin.	Mono-Cent.	Lymphomes non HK type B

3 De Ruyck K., Lambert B., Bacher K., Gemmel F., De Vos F., Vral A., de Ridder I., Dierckx RA., Thierens H., *Biologic dosimetry of ^{188}Re-HDD/lipiodol versus ^{131}I-Lipiodol therapy in patients with hepatocellular carcinoma*, J. Nucl. Med., 2004, 45, p. 612-618.

4 Nguyen H., Ghanem G., Morandini R., Verbist A., Larsimont D., Fallais C., Fruhling J., Van Houtte P., *Tumor type and vascularity : important variables in infusional brachytherapy with colloidal ^{32}P*, Int. J. Radiat Oncol. Biol. Phys., 1997, 39, p. 481-487.

Iode-125 (EC et émetteur gamma : T1/2 physique : 60,14 jours)			
Grains	Clinique	Nationale**	Cancers prostatiques
Yttrium-90 (émetteur bêta pur : T1/2 physique : 2,67 jours)			
Colloïdes	Clinique	Nationale	Radio-synoviorthèses
Ibritumomab	Dév. Clin.	Multi-Centr.	Lymphomes non HK type B
Octreotide.	Dév. Clin.	Multi-Centr.	Tumeurs neuro-endocrines
Microsphères	Dév. Clin.	Multi-Centr.	Tumeurs hépatiques
Lutetium-177 (émetteur gamma et bêta : T1/2 physique : 6,71 jours)			
Octretide.	Dév. Clin.	Multi-Centr.	Tumeurs neuro-endocrines
Samarium-153 (émetteur gamma et béta : T1/2 physique : 1,95 jours)			
EDTMP	Clinique	Nationale	Métastases osseuses douloureuses
Rhenium-186 (émetteur gamma et béta : T1/2 physique : 3,78 jours)			
HEDP	Rech. Clin.	Mono-centr.	Métastases osseuses douloureuses
Rhenium-188 (émetteur gamma et bêta : T1/2 physique : 16,98 heures)			
HEDP	Rech. Clin.	Mono-Centr.	Métastases osseuses douloureuses
HDD/Lipiodol	Rech. Clin.	Mono-Centr.	Tumeurs hépatiques
Fer-52 (émetteur de positrons, gamma, T1/2 physique : 8,28 heures)			
	Rech. Clin.	Mono-centr.	Myélo-ablation
Phosphore-32 (émetteur bêta, T1/2 – physique : 14,29 jours)			
Colloïdes	Clinique	Nationale	Maladies hématologiques
Colloïdes	Rech. Clin.	Mono-centr.	Irradiation tumorale locale
Strontium-89 (émetteur bêta et gamma : T1/2 physique : 50,55 jours)			
Chloride	Clinique	Nationale	Métastases osseuses douloureuses
Iridium-192 (émetteur bêta et gamma : T1/2 physique : 74,02 jours)			
Solutions	Clinique	Nationale**	Brachythérapies endovasculaires
Fils	Clinique	Nationale**	Brachythérapie
Grains	Clinique	Nationale**	Brachythérapie (prostate)
Palladium-103 (EC et gamma : T1/2 physique : 16,96 jours)			
Grains	Clinique	Nationale**	Brachythérapie prostatique
Or-198 (émetteur bêta et gamma : T1/2 physique : 2,68 jours)			
Grains	Clinique	Nationale**	Brachythérapie prostatique

* Limité aux centres disposant de chambres métaboliques (pour l'isolation du patient)
** Sous la responsabilité d'un spécialiste en radiothérapie

Rech. Clin. = recherche clinique, études de phase I-II
Dév. Clin. = développement clinique, études phase III
Nationale = tout service de médecine nucléaire
Mono-centr. = étude limitée à un centre
Multi-centr. = étude multi-centrique (parfois internationale)

Bibliographie complémentaire

Ferrant A., Cogneau M., Leners N., Jamr F., Martiat P., Michaux JL., *^{52}Fe for additional marrow ablation before bone marrow transplantation*, Blood 1993, 81, p.3435-3439

Glinoer D., *Radioidoine therapy of non toxic multinodular goitre*, Clin Endocrinol (Oxf), 1994, 41, p.713-714

Daumerie C., Vynckier S., Caussin J., Jadoul M., Squifflet JP., de Patoul M., Wanbersie A., *Radioiodine treatment of thyroid carcinoma in patients on maintenance hemodialysis*., Thyroid 1996, 6, p. 301-304

Hennen G., McNamara EM., Docker A., Joachim M., *Radioiodine ^{131}I as the only treatment of hyperthyroidiem. Results of 10 years of experience*, Rev. Med. Liège, 1999, 54, p. 611-617

Beckers C., *1361I therapy of toxic and non toxic goiters*, Q. J. ? Nucl. Med., 1999, 43, p. 291-296

Brans M., Bacher K., Dierckx R., Thierens H., *Patients dosimetry for ^{131}I-MIBG therapy for neuroendocrine tumors based on ^{123}I-MIBG scans*, Eur. J. Nucl. Med. Mel. Imaging, 2002, 29, p. 1581-1587

PARTIE IV

LA FUSION THERMONUCLÉAIRE CONTRÔLÉE

La fusion thermonucléaire contrôlée

Paul VANDENPLAS

Professeur émérite à l'École royale militaire

I. Introduction

La fusion nucléaire, la source de la puissance rayonnée par le soleil et les autres étoiles, possède le potentiel d'une source d'énergie terrestre, intrinsèquement sûre et environnementalement bénigne. La recherche en fusion nucléaire contrôlée a débuté au début des années 1950 et est totalement déclassifiée depuis 1958. Elle n'a pas été traitée dans l'ouvrage « Un demi-siècle de nucléaire en Belgique » de 1990 et il convient donc de d'abord la caractériser et de synthétiser son développement en Belgique avant cette date.

Contrairement à la fission nucléaire où un atome (noyau), très lourd est fissionné en deux par un neutron incident et où une petite fraction de la masse, Δm, est convertie en énergie ($E = c^2 \Delta m$), la fusion nucléaire est caractérisée par deux noyaux légers (par ex. des isotopes d'hydrogène) fusionnant ensemble pour former un noyau plus lourd (par ex. de l'hélium) qui est quelque peu plus léger que les deux noyaux initiaux ; à nouveau la différence de masse, Δm, est convertie en énergie. Mais pour que les deux noyaux, possédant chacun une charge positive, et se repoussant dès lors, puissent fusionner, il faut leur communiquer beaucoup d'énergie afin de vaincre la forte répulsion électrique et de permettre à la force nucléaire attractive, beaucoup plus forte à très courte distance, d'entrer en jeu pour former le nouveau noyau stable. Pour que les atomes d'un gaz puissent avoir une grande énergie d'agitation thermique il faut une température très élevée (des millions de degrés). À ces hautes températures, les atomes entrant en collision arrachent les électrons (charge négative) du noyau (charge positive) pour former un nouvel état de la matière appelé « plasma » consistant en une mer d'électrons et d'ions en interaction électromagnétique.

Comment confiner ce plasma chaud ? Dans une étoile comme le soleil, ceci s'opère par la gravité de cette énorme masse confinant un plasma

(75 % d'hydrogène) dense à une température d'environ 15 millions °C. Par une série de réactions, l'hydrogène est lentement fusionné en hélium en libérant l'énergie qui rend la vie sur terre possible. Si par contre, on désire créer un petit soleil sur terre dans un volume de quelques milliers de m^3, la gravité est tout à fait incapable de confiner les particules énergétiques et nous devons confiner ce plasma chaud d'ions et d'électrons d'une autre manière. Celle-ci consiste à créer une « bouteille magnétique »[1] en utilisant des champs magnétiques qui agissent sur les particules électriquement chargées. La réaction la moins difficile à réaliser consiste à fusionner du deutérium (D : isotope lourd naturel de l'hydrogène) et du tritium (T : isotope radioactif plus lourd de l'hydrogène d'une durée de demi-vie de 12,5 ans et uniquement présent sur terre à l'état de trace) pour donner de l'hélium ^{4}He, un neutron et de l'énergie.

$$D + T \rightarrow {}^4He + n + \text{énergie (17,6 MeV)}$$

Une telle énergie est 10 millions de fois plus grande qu'une réaction chimique énergétique typique. C'est pourquoi une centrale électrique à charbon de 1GW brûle 10 000 t de charbon par jour tandis qu'une centrale à fusion de 1GW ne consommerait chaque jour qu'environ 1 kg de D + T.

Dans une réaction D + T, 80 % de l'énergie se trouve dans les neutrons de 14 MeV qui sont insensibles au champ magnétique et bombardent donc la paroi du réacteur. Les 20 % d'énergie restants se trouvent dans les ions d'hélium de 3,6 MeV qui sont piégés dans la bouteille magnétique et réchauffent ainsi le deutérium et le tritium par collisions. Dans un réacteur à fusion, c'est ainsi que la température sera essentiellement maintenue.

Comment produire le tritium ? Lorsque bombardé par les neutrons énergétiques, le lithium se transforme en un mélange de tritium, d'hélium (^{4}He) et de neutrons. C'est ainsi que le tritium sera engendré dans la couverture de la paroi, contenant des alliages de lithium, tandis que l'énergie sera évacuée par un fluide caloporteur à la turbine de la centrale.

Les combustibles primaires de la fusion sont donc le deutérium et le lithium. Le deutérium est extrait de l'eau (un atome D pour 3350 molécules d'eau) et il y a du deutérium dans les océans pour plusieurs centaines de millions d'années. Le lithium est un métal commun dans la croûte terrestre et dans les océans fournissant un approvisionnement pour des milliers d'années.

---

[1] Nous ne ferons pas mention de la fusion inertielle dans laquelle un micro-granule de D-T est comprimé et amené à haute température par rayonnement laser ou par faisceaux d'ions ou d'électrons très énergétiques. Il en résulte une micro-explosion. Actuellement cette approche est beaucoup plus éloignée d'une application énergétique que la fusion magnétique.

II. Création de l'Association « EURATOM – État belge » pour la fusion contrôlée – la fusion en Europe et dans le monde

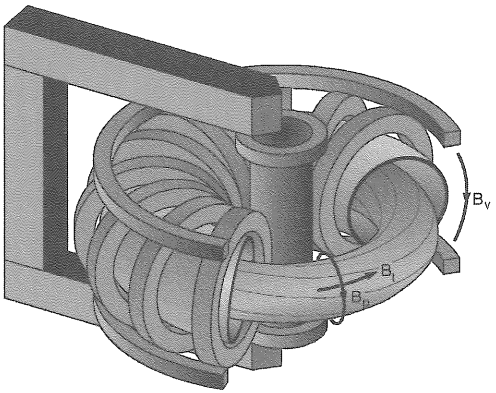
L'Association Euratom – État belge pour la fusion contrôlée fut créée en 1969, 10 ans après la création de la première Association Euratom, avec comme membres fondateurs belges : le Laboratoire de physique des plasmas de l'École royale militaire/Koninklijke Militaire School (LPP-ERM/KMS) et l'Unité de physique statistique et plasmas de l'Université libre de Bruxelles (PSP/ULB). Le Centre d'études nucléaires/Studiecentrum voor kernenergie (SCK•CEN) entreprit une première collaboration en technologie de la fusion en 1975 pour devenir laboratoire associé en 1982.

Si dès 1969, l'effort belge s'est immédiatement inséré dans le cadre européen d'Euratom, lequel s'insert dans un contexte mondial, les liens et les collaborations européens et internationaux se sont intensifiés dans les années 1980 de telle manière que l'activité belge ne saurait être explicitée sans se référer d'abord à l'évolution globale des recherches en fusion.

Depuis le début des années 1970, la recherche mondiale s'est concentrée sur un dispositif toroïdal appelé tokamak (Figure 1).

Le plasma est chauffé jusqu'à 10 à 30 millions °C par l'effet Joule du courant du plasma tandis qu'un chauffage additionnel provenant soit de l'injection de molécules énergétiques de D, soit d'énergie radio-fréquence amène le plasma à plus de 100 millions °C (qui correspond à une énergie d'environ 10 keV).

Figure 1 : Représentation schématique d'un tokamak



Un champ magnétique toroïdal axial B_t est créé par les bobines verticales. Le primaire du grand transformateur induit un courant toroïdal dans le plasma qui agit comme le secondaire d'un transformateur. Ce courant de plasma crée un champ poloïdal B_p perpendiculaire au courant. La combinaison des champs magnétiques toroïdal et poloïdal est un champ hélicoïdal qui confine le plasma chaud en l'éloignant des parois.

Les progrès spectaculaires sont montrés à la Figure 2. Le facteur clé $nT\tau_E$ y est représenté en fonction de la température T. Ce facteur mesure le taux de réactions de fusion par unité de volume. La densité n du plasma doit être suffisamment grande, la température T doit être plus grande que 100 000 000 °C et le « temps de confinement de l'énergie τ_E » qui mesure l'isolation du plasma vis-à-vis de la paroi doit être suffisamment grand.

Figure 2 : Le produit $nT\tau_E$ en fonction de la température T (une énergie de 1 keV correspond à environ 10 millions °C)

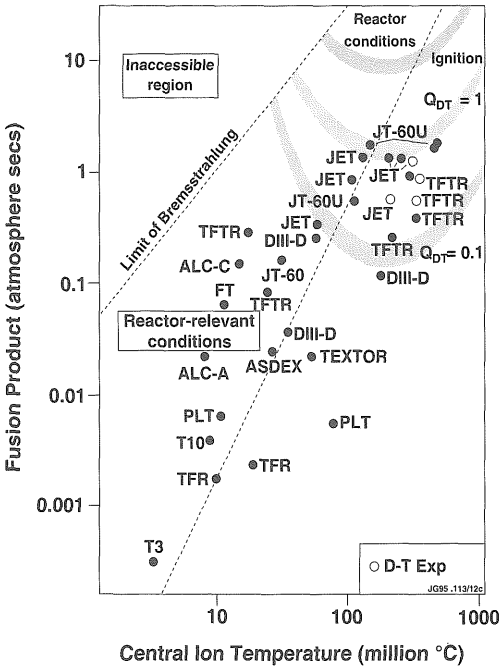


Tableau 1 : Réalisation de valeurs $nT\tau_E$ en fonction du temps

Produit de fusion $nT\tau_E$	Période
0,0001 atmsec	1968
0,001 atmsec	1970-1980
0,001 – 0,01 atmsec	1980-1997
1 atmsec	1997

Un autre facteur est Q, le facteur de multiplication de l'énergie, c'est-à-dire l'énergie libérée par la fusion divisée par l'énergie injectée dans le

plasma afin de l'amener à la température de fusion. Ce facteur Q est lui-même une fonction de $nT\tau_E$. Afin d'avoir un réacteur économiquement rentable ce facteur doit être supérieur environ à 20-30 tandis que $Q = \infty$ signifie que la fusion est auto-entretenue sans aucune injection d'énergie. Le tableau 1 montre clairement les progrès impressionnants accomplis entre 1968 et 1997, période pendant laquelle $nT\tau_E$ a augmenté d'un facteur 5000 ; il n'est éloigné que d'un facteur 5 ce qui est actuellement jugé nécessaire pour un réacteur commercial.

Un Q_{DT} proche de 1 a été obtenu en 1997 sur JET (*Joint European Torus*), le tokamak européen localisé à Culham, Grande-Bretagne, qui est le plus grand au monde.

Activités belges de 1969 à 1990

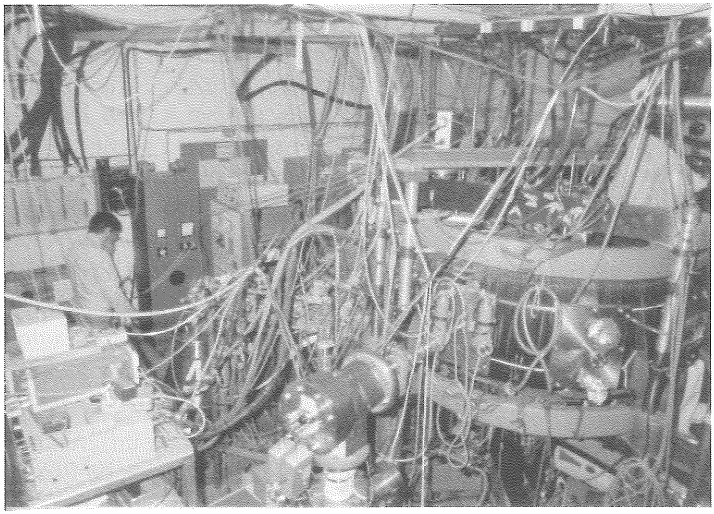
L'activité pendant la période 1969-1990 peut se résumer de la manière suivante :

1. LPP-ERM/KMS

1969-1975 : Étude de la propagation d'ondes électromagnétiques dans les plasmas et des structures de couplage ondes-plasmas.

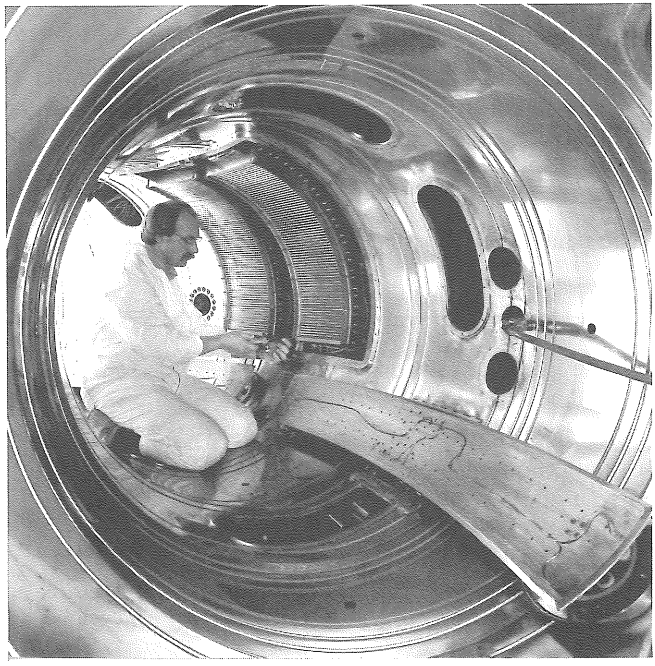
1976-1981 : Développement tant théorique qu'expérimental du chauffage ion-cyclotronique des plasmas sur ERASMUS, le premier tokamak universitaire européen.

Figure 3 : ERASMUS a permis à partir de 1976, avec quelques autres laboratoires dans le monde, de rendre le chauffage ion-cyclotronique du plasma possible



1981-1990 : Construction et exploitation du chauffage ion-cyclotronique à 3MW du tokamak TEXTOR de l'"Association Euratom-KFA" de Jülich et étude du confinement de ces plasmas.

Figure 4 : Intérieur de TEXTOR, avec les antennes de chauffage ion-cyclotronique du LPP-ERM/KMS



C'est un tokamak moyen très performant tant au point de vue du confinement que des interactions du plasma avec la paroi

2. PSP-ULB

1969-1990 : Physique statistique des plasmas et particulièrement les phénomènes de transport.

Étude des plasmas relativistes.

Théorie du transport néoclassique.

Étude de la turbulence notamment par le groupe de renormalisation.

3. SCK•CEN

1975-1990 : Propriétés mécaniques après irradiation de différents matériaux. Métaux liquides dans champ magnétique. Électrolyse de l'eau tritiée.

Maintenance à distance, irradiation de fibres optiques. Étude critique de la fusion froide.

III. ITER de 1988 à 2006 et le futur

Ces progrès ont conduit en 1988 au projet d'un réacteur expérimental international ITER afin de démontrer la faisabilité technico-scientifique de la fusion en tant que source d'énergie. ITER, le « chemin » en latin, souligne qu'il s'agit de la voie choisie vers le réacteur commercial. Quatre partenaires (UE, Japon, États-Unis et USSR-Russie) ont entamé alors la phase d'étude conceptuelle, suivie d'une phase d'ingénierie détaillée qui a conduit en juillet 1998 à un rapport final, accompagné des plans détaillés d'une machine de fusion de 1500 mégawatts (MW) au coût initialement convenu. La situation politico-économique d'alors a conduit à réduire la machine à 500 mégawatts pour un coût moitié avec un $Q \geq 10$, l'Europe continuant à jouer un rôle moteur tandis que les États-Unis ont quitté le projet en 1999 et c'est en juillet 2001 que le dessin final du nouvel ITER fut adopté et que les négociations débutèrent. Finalement, en décembre 2005, sept partenaires (États-Unis, Japon, Chine, Russie, EU, Corée du Sud et Inde) sont réunis pour la construction d'ITER en Europe (Cadarache, France) ; l'accord de la construction pour un prix de 4,5 milliards d'EUR a été paraphé en mai 2006.

ITER fournira les données physiques essentielles à un futur réacteur expérimental ainsi que d'importantes données technologiques. Rappelons cependant que la paroi sera soumise à des années de bombardement intense par des neutrons de 14 MeV. Ceci entraînera des dommages ainsi que la production d'une radioactivité à courte durée de vie. Actuellement, nous disposons des aciers spéciaux utilisés dans les réacteurs à fission conventionnels, qui sont actuellement adéquats puisque ITER opérera au maximum quelques heures par jour avec un flux neutronique de 30 % de celui d'un futur réacteur commercial. C'est pour ce dernier qu'une machine d'essai des matériaux avec un accélérateur est également nécessaire : un tel projet préliminaire existe. Il s'agit de l'*International Fusion Material Irradiation Facility* (IFMIF) et son coût est estimé à 850 millions d'EUR. Ceci, combiné avec de la modélisation et avec des données également obtenues avec les neutrons de réacteurs à fission, permettra de caractériser les matériaux nécessaires aux futurs réacteurs à fusion de puissance.

De plus, l'Europe et le Japon se préparent à collaborer à une approche rapide et large (*broader approach*) de la fusion afin de conduire, si le calendrier est respecté, à la construction, vers 2025, d'un réacteur de démonstration, DEMO, produisant de l'électricité. Ceci permettrait d'avoir les premiers réacteurs commerciaux vers 2045-2050.

IV. Contribution belge pendant la période 1990-2006

La contribution belge s'articule dans le cadre des activités décrites aux paragraphes 2 et 3.

A. ERM/KMS

Les activités ont été centrées sur :

- L'influence de manteaux radiatifs et des champs électriques périphériques sur le confinement du tokamak tant sur TEXTOR que sur JET ainsi que sur la compréhension de ces phénomènes complexes.
- Le chauffage ion-cyclotronique (ICRH) de TEXTOR au niveau de 4 MW, l'antenne du type ITER qui sera installée prochainement sur JET ainsi que sur le chauffage ion-cyclotronique d'ITER.
- Appui en théorie, en technologie et en diagnostics à JET et ITER. Ceci se traduit notamment par des études théoriques approfondies de l'ICRH et le développement de codes puissants englobant une grande partie de la complexité du plasma.

Ce programme est actuellement exécuté par 26 professionnels et 11 membres du personnel avec un budget de 3.31 MEUR. Il comporte de nombreuses collaborations européennes et internationales. La collaboration initiée en 1981 avec le *Forschungszentrum Jülich* a été étendue en 1995 au laboratoire de Rijnhuizen de la « fundamenteel onderzoek van materie » (FOM) pour former le Trilateral Euregio Cluster (TEC) qui constitue le premier exemple d'un cluster inter-européen en fusion.

B. ULB

Étude théorique de la physique des plasmas de fusion.

- Utilisation du modèle hamiltonien de projection des lignes de forces magnétiques conduisant au modèle de représentation dit TOKAMAP.
- Études des processus de transport dans les plasmas.
- Étude tant théorique que par simulation numérique de la turbulence plasma en relation avec le transport et le chauffage.

Environ 13 scientifiques et un appui de 2 personnes exécutent ce programme avec un budget annuel (2002) de 0,9 MEUR. Une collaboration poussée existe avec le CEA français et avec la Roumanie.

C. SCK•CEN

Le travail depuis 1990 peut se résumer par la :

- Caractérisation de l'irradiation de matériaux tant de structure que des composants exposés au plasma.

- Tolérance à l'irradiation de l'instrumentation nécessaire à la manipulation à distance et aux diagnostics.
- Étude de la corrosion ainsi que des réactions du béryllium avec de l'eau ou de la vapeur.
- Étude de différents aspects de la sûreté du réacteur et de l'impact sur l'environnement.
- Utilisation du réacteur BR2 et des cellules chaudes pour la caractérisation de matériaux.

Le programme est exécuté par l'équivalent temps plein d'environ 10 professionnels et de 10 personnes d'appui avec un budget (2002) de 3,5 MEUR.

D. Industrie

TRASYS a été chargée du système informatique d'acquisition de données du JET dès le début de l'entreprise et son contrat court toujours.

AMOS a construit la cuve à vide du spheromak MAST de l'UKAEA à Culham.

Belgatom, filiale à 80 % de Tractebel Engineering et à 20 % de la Belgonucleaire, est un des 7 partenaires du consortium industriel "*European Fusion Engineering and Technology*", EFET qui fut créé en 1993. C'est par ce biais que les grandes compagnies d'ingénierie et de conception de systèmes nucléaires ont réuni leurs capacités pour soutenir le développement de la fusion en tant que source d'énergie pour la génération commerciale d'électricité. Les objectifs majeurs d'EFET sont de participer à l'ingénierie détaillée d'ITER et de sa construction ainsi que de fournir son expertise pour le projet et la construction de toute autre unité importante de fusion. Le montant des contrats confiés à EFET depuis sa création s'élève à 55 millions d'euro.

V. Remarques finales
Caractéristiques de l'énergie de fusion

La future activité de recherche-développement belge s'articulera surtout dans la perspective de la construction d'ITER à Cadarache : l'ERM/KMS avec une contribution significative au chauffage ion-cyclotronique, l'ULB par ses études théoriques et modèles sur les turbulences, le confinement et le contrôle du plasma et le SCK•CEN par sa participation à la qualification des aciers à faible activation et aux diagnostics tolérants aux radiations. La future participation industrielle devrait être substantielle au travers de Belgatom via l'EFET et, espérons-le, des PME à l'instar de celles qui en ont donné l'exemple dans le passé. Un tel effort se justifie par le fait que l'énergie de fusion est une énergie essentiellement illimitée, intrinsèquement sûre et environnementalement bénigne :

- Les combustibles primaires – deutérium et lithium – sont pratiquement illimités et bon marché.
- Intrinsèquement sûr car à un moment donné seule une très petite quantité de deutérium-tritium est présente dans un grand volume et une réaction d'emballement est impossible d'après les lois de la physique.
- Le produit principal de la réaction de fusion est de l'hélium, gaz inerte non radioactif. L'enveloppe du réacteur devient radioactive suite au bombardement neutronique mais la radioactivité diminue avec une demi-vie d'environ 10 ans de telle manière que les composants peuvent être recyclés endéans ~ 100 ans de désactivation.
- Le tritium a une demi-vie de 12 ans et le réacteur peut être construit afin que même dans le cas le plus extrême (séisme majeur ou chute d'avion), seule une petite quantité de tritium soit relâchée dans l'atmosphère, ce qui ne nécessiterait pas l'évacuation de la population environnante.
- Il n'y a clairement pas de production de CO_2 ou d'autre gaz polluant ou à effet de serre.

Des études approfondies ont montré que suivant la solution technologiquement retenue le prix serait sur la base actuelle de 0,03 à 0,09 EUR par kWh et ceci sans prendre en compte une taxe de carbone qui diminuerait encore le prix relatif. Bien entendu, vers 2050, des paramètres comparatifs importants, difficiles à évaluer interviendront.

Parce qu'en 1958 quelques optimistes, alors que les connaissances en physique des plasmas étaient très réduites, espéraient obtenir la fusion en 50 ans, une plaisanterie veut « que la fusion est toujours éloignée de 50 ans ». En réalité, le progrès du facteur de multiplication de l'énergie Q de 1/100 000 à la fin des années 1960 jusqu'à la valeur actuelle de près de 1 est extrêmement impressionnant et comparable à la célèbre loi de Moore pour le rapide progrès du nombre de « chips » sur un microprocesseur. ITER aura un facteur Q de l'ordre de 10 et devrait confirmer ainsi la faisabilité scientifique de la fusion.

Actuellement, en 2006, bien que dix ans aient été perdus par atermoiements politico-financiers, le réacteur commercial est en vue. Le présent et le futur énergétique de l'humanité requièrent que dans un éventail de mesures et de solutions énergétiques à implémenter immédiatement, la fusion nucléaire contrôlée occupe une place de choix. C'est la seule source d'énergie pour laquelle le combustible (deutérium et lithium) est disponible pour des millions d'années et donc apte à fournir un approvisionnement en énergie sûr et environnementalement favorable. Elle possède tous les avantages des meilleures sources d'énergie renouvelable.

PARTIE V

LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE, LA RADIOPROTECTION ET LEUR CONTRÔLE

La sûreté nucléaire, la radioprotection et leur contrôle

Pierre GOVAERTS et Pierre TONON

Président d'AVN
Commissaire du Gouvernement auprès de l'AFCN

I. L'évolution de la réglementation, la création de l'AFCN et sa collaboration avec les organismes agréés

Le chapitre 3 du livre de la BNS, *Un demi siècle de nucléaire en Belgique*, a exposé les discussions et les conclusions des Commissions parlementaires créées après l'accident de Tchernobyl et l'affaire Transnuklear, couvrant la période jusqu'en 1991.

Sous l'impulsion de J.P. Poncelet, aidé par quelques collaborateurs membres du SPRI, un projet de loi fut déposé en 1992 proposant la création d'une Agence fédérale de contrôle nucléaire (AFCN) qui rassemblerait en une seule entité les services s'occupant du nucléaire dans les différents ministères.

Ceci devint la loi du 15 avril 1994, qui créa l'AFCN en tant que parastatal de type C.

Il était prévu une mise en service progressive des différents articles de cette loi. En une première phase, le personnel du service de protection contre les rayonnements ionisants (le SPRI) et celui du service de la sécurité technique des installations nucléaires (le SSTIN) furent intégrés dans l'AFCN.

Les membres du conseil d'administration de l'AFCN furent nommés en 1997. D'après un article de la loi créant l'AFCN, le président du conseil d'administration et le directeur général doivent être de rôle linguistique différent, ce qui conduisit à la désignation de Pierre Reynders comme président du conseil d'administration et de Jean-Paul Samain comme directeur général, avec effet au 1er décembre 1998. Pierre Tonon fut nommé commissaire du Gouvernement.

La révision de l'arrêté royal du 28 février 1963 commença aussi durant cette période, pour le mettre en cohérence avec les différents articles de la loi de 1994 définissant les pouvoirs et les tâches de l'AFCN, et pour introduire les textes d'application de plusieurs directives Euratom. L'avis de certains organismes, comme le Comité supérieur de l'hygiène publique ou le SCK•CEN, fut demandé, mais les organismes agréés nucléaires ne furent pas consultés.

Le nouvel arrêté royal fut promulgué le 20 juillet 2001, remplaçant et abrogeant celui du 28 février 1963, mais en prenant soin de conserver autant que possible pour chaque sujet la numérotation de l'ancien arrêté royal. Ainsi la loi de 1994 put devenir opérationnelle et l'AFCN fut créée officiellement le 1er septembre 2001.

Cependant la collaboration et le partage des tâches entre l'AFCN et les organismes agréés (OA), auxquels un ensemble de tâches était confié par l'arrêté royal du 28 février 1963, n'avaient pas encore été définis et la loi du 15 avril 1994 fut complétée par l'article 52 bis qui instaurait une période transitoire reconductible annuellement, pendant laquelle les exploitants et les organismes agréés désignés étaient tenus de travailler comme avant.

L'AFCN a comme mission de veiller à ce que la population et l'environnement soient protégés d'une manière efficace contre le danger des rayonnements ionisants.

Elle propose des lois et des règlements et veille à ce que ces lois et règlements soient observés. Elle instruit toutes sortes de demandes d'autorisation et, selon le cas, propose ou prend des décisions, éventuellement sur avis de son Conseil scientifique ou d'autres organes d'avis. Elle assure la surveillance, le contrôle et les inspections de toutes les pratiques et activités qui impliquent la mise en œuvre de rayonnements ionisants. L'Agence prend également en charge les activités de contrôle des matières nucléaires qui garantissent que celles-ci sont utilisées aux fins auxquelles elles sont destinées (*safeguards* et non-prolifération).

Elle participe aux travaux des organisations et instances internationales (telles que l'Union européenne et l'Agence internationale de l'énergie atomique), où sont élaborés des directives, recommandations ou règlements internationaux.

Elle assure la gestion du réseau Télérad pour la surveillance radiologique du territoire belge. Elle joue un rôle important dans la mise en œuvre des plans d'urgence nucléaires, notamment en ce qui concerne l'évaluation des conséquences d'un accident et la communication de crise avec la population et les media.

Elle est chargée de constituer une documentation scientifique, technique ainsi que de diffuser une information neutre et objective dans le

domaine de la sûreté nucléaire et de la protection radiologique. Elle est aussi chargée de stimuler et de coordonner les travaux de recherche et de développement dans ces mêmes matières.

Les principales matières couvertes par le Règlement général sont les suivantes :

- Les normes de base de radioprotection ;
- La réglementation des établissements classés ;
- Le contrôle des installations ;
- Le transport et l'importation des substances radioactives ;
- La surveillance radiologique du territoire et les plans d'urgence ;
- Les applications médicales des rayonnements ionisants ;
- La radioactivité naturelle.

Au printemps 2003, P. Reynders fut remplacé par Tom Vanden Borre comme Président du conseil d'administration de l'AFCN. Son premier mandat se terminant en décembre 2004, J.P. Samain fut renommé directeur général en avril 2005. Cependant un audit effectué par un bureau de consultance externe à la demande du ministre de tutelle, mit en évidence un certain nombre de dysfonctionnements au niveau de la gestion, ce qui conduisit à ce que le directeur général et 2 autres directeurs quittent leur fonction. W. De Roovere fut nommé directeur général en juin 2006 et, vu l'alternance des rôles linguistiques, M. Jurisse remplaça *ad interim* M.T. Vanden Borre à ce moment.

Une des tâches attendant le nouveau directeur général est de fixer les modalités de collaboration entre l'AFCN et les organismes agréés afin de mettre un terme à la période transitoire permise par l'article 52 bis et éviter duplication et non-cohérence dans le travail.

Comme la loi de 1994 confère à l'AFCN toutes les responsabilités en matière de contrôle et de surveillance de toutes les installations utilisant des matières radioactives, en laissant à l'AFCN la possibilité de déléguer, suivant ses choix, certaines de ces tâches aux organismes agréés, cette loi crée par là même un problème de concurrence potentielle entre l'AFCN et les OA, puisque l'AFCN peut reprendre petit à petit le travail des OA, dans les domaines où elle se forme, et conduire ainsi à la disparition à terme des OA, ce qui pose bien sûr à ces derniers un problème de maintien de leur compétence et de leur existence. Ces problèmes avaient été soulevés dans un exposé de J.J. Van Binnebeek, directeur général d'AVN, à la BNS en janvier 2002.

Comme l'AFCN doit appliquer la loi sur les marchés publics et que les articles 28 à 30 de la loi de 1994 mentionnent cahier des charges et appels d'offres, des discussions ont débuté en 2003 entre l'AFCN et les

OA pour trouver une solution afin de ne pas devoir recourir aux marchés publics. Diverses propositions furent avancées, notamment la création d'un TSO (*Technical Support Organization*, suivant les termes de l'AFCN) auquel l'AFCN confierait un certain nombre de tâches. Le concept même de TSO a évolué dans le temps, depuis une structure « vide » de simple répartition du travail entre les OA, jusqu'à une structure où tout le personnel des OA serait transféré et où l'AFCN détiendrait la majorité dans les organes de décision, notamment au conseil d'administration, condition nécessaire pour éviter les marchés publics. Ceci correspondait en fait à une nationalisation déguisée des organismes agréés, proposition faite fin 2005 mais qui ne reçut pas l'accord de Techni-Test et d'AVN.

Une analyse, demandée par AVN à un expert en matière de marchés publics, montra qu'une « concession de service public » était une solution tout à fait envisageable, mais l'AFCN ne la prit pas en considération et cette solution ne fit jamais l'objet de sa part d'un examen approfondi avec AVN.

Fin 2005, T. Vanden Borre proposa de faire appel à un « facilitateur » pour éviter les malentendus et rapprocher les points de vue entre l'AFCN et les OA. Le conseil d'administration de l'AFCN proposa F. Deconinck, Président du conseil d'administration du SCK•CEN, ce que toutes les parties accueillirent favorablement.

La position du CA de l'AFCN fut explicitée dans une note de mars 2006, celle d'AVN en avril 2006, avec une proposition de définition des tâches respectives de l'AFCN et des OA.

Durant le premier semestre 2006, le Professeur Deconinck rencontra les délégations des conseils d'administration des diverses organisations (AFCN, AVC, AVN, Techni-Test tenu informé), ce qui permit d'éclaircir les positions et de mettre en évidence les points d'accord et de désaccord.

Une des conclusions était de maintenir l'existence des OA, position déjà présente dans la note de l'AFCN de mars 2006. Mais en octobre les représentants de l'AFCN déclarèrent que le rapport du « facilitateur » n'était pas satisfaisant, que le CA de l'AFCN avait changé d'avis et mettait fin à la mission du Professeur Deconinck. On peut regretter cette volte-face, qui a conduit à un gaspillage de temps et d'énergie.

Le rapport du « facilitateur », avec ses conclusions et recommandations, a été présenté en octobre 2006.

En parallèle, conformément à l'article 33 du Règlement de la Chambre, un groupe de travail a été constitué à la suite d'une décision unanime de la Commission de l'intérieur, des affaires générales et de la fonction publique du 15 février 2006. Ce groupe de travail s'est vu assigner la mission d'élaborer une proposition de résolution en vue d'améliorer le

fonctionnement de l'Agence fédérale de contrôle nucléaire, à la suite des dysfonctionnements relevés par l'audit externe.

Le groupe de travail a été constitué le 30 mai 2006. Il était composé de :

- Philippe De Coene, président,
- Jacques Chabot, vice-président,
- Mme Simonne Creyf, rapporteur,
- 5 membres effectifs et de 7 membres suppléants.

Le groupe de travail s'est réuni à 22 reprises et outre 9 réunions de travail, il a entendu à huis-clos Pierre Tonon, commissaire du gouvernement de l'AFCN et une vingtaine de personnes provenant notamment de l'AFCN, d'organismes agréés, du monde industriel et médical. Son rapport date du 23 avril 2007 et formule 44 recommandations relatives à : le statut et les missions de l'AFCN, le contrôle externe de l'AFCN, le conseil d'administration / la direction, le financement, la perception des redevances et utilisation des réserves, la comptabilité et contrôle de la qualité, la réglementation et autorisations, l'organisation interne de l'AFCN, la politique du personnel, la communication et le dialogue, le rôle international et les tâches spécifiques en matière de suivi de la radioprotection et de la protection physique.

Une seule recommandation est relative aux relations entre l'AFCN et les Organismes Agréés : elle propose « la filialisation des OA pour effectuer les contrôles imposés par la loi, à partir du moment où l'AFCN sera devenue tout à fait opérationnelle et aura réussi à surmonter les dysfonctionnements du passé ».

La période transitoire, pendant laquelle les exploitants et les organismes agréés désignés étaient tenus de travailler comme avant, a été reconduite plusieurs fois et la dernière court jusqu'au 31 août 2007.

À partir de juin 2007, le CA de l'AFCN a voulu appliquer cette recommandation et a créé en septembre 2007 une filiale « BEL V » de droit privé destinée à accueillir le personnel transféré des OA. Se rendant compte du caractère inéluctable de la « filialisation », les OA en avaient discuté les modalités d'application avec l'AFCN, sous la forme d'« Accords de Principe » à faire approuver par les CA respectifs. Au début octobre 2007, après avoir discuté avec des représentants du CA de l'AFCN, le ministre de l'Intérieur, qui exerce la tutelle de l'AFCN, s'est opposé à cette procédure et a cassé la décision du CA de l'AFCN. La raison, citée comme principale, est que ceci ne peut être réalisé par un gouvernement « en affaires courantes ».

II. L'évolution des organismes agréés

L'évolution des organismes agréés à partir de 1990-1991 continue les descriptions données dans le chapitre 3, section 5 du livre de la BNS. Comme il y a été indiqué, les organismes agréés dans le cadre de la réglementation nucléaire (arrêté royal du 28 février 1963) étaient 4 en 1990.

A. Techni-Test

Techni-Test contrôle des installations de classe 2 et 3 médicales : appareils de thérapie ou de diagnostic, appareils à RX dans les hôpitaux, chez les radiologues, vétérinaires, médecins, dentistes. Des services de médecine nucléaire, des laboratoires RIA, également des installations industrielles. Ses activités s'étendent au contrôle de l'évacuation de sources diverses, de détecteurs ioniques, de paratonnerres radioactifs et des activités de transport.

En 1999, suite au décès du directeur général Ir. Paul Manche, la fonction est assurée par Ir. Bernard Manche.

L'arrêté royal du 20 juillet 2001 impose quantité de tâches supplémentaires tant pour les établissements classés que pour les organismes agréés.

Dans le souci constant de mettre ses membres en ordre avec la législation, Techni-Test propose tous les services requis : information, calcul de protections, préparation du dossier de demande d'exploitation, contrôle physique, dosimétrie et radio physique médicale.

Le domaine d'activité en radio physique médicale a également été étendu au Grand-duché de Luxembourg.

B. CORAPRO

CORAPRO exerçait le contrôle d'établissements de classe 1 à caractère public tels que le centre de recherche SCK•CEN de Mol, l'Institut des radioéléments à Fleurus, Belgoprocess, le réacteur Thetis de l'Université de Gand, l'usine de fabrication de combustible de la Belgonucleaire, ainsi qu'une bonne partie d'établissements de classe 2 (notamment des hôpitaux universitaires) et un petit nombre d'installations de classe 3.

Le devenir des organismes agréés devint un sujet de préoccupation majeur pour leurs dirigeants après le vote de la loi du 15 avril 1994 créant l'Agence fédérale de contrôle nucléaire. Des discussions informelles entre les présidents des conseils d'administration et les directeurs de CORAPRO et d'AVN eurent lieu à l'automne 1994, concluant à la nécessité de se tenir mutuellement informés mais sans décision d'action concrète.

Lors d'une réunion de l'Association belge de radioprotection au printemps 1995, Pierre Govaerts eut l'occasion de discuter avec des membres

du personnel de CORAPRO sur les perspectives d'avenir, rencontre qui se matérialisa ensuite par une invitation à venir discuter à Mol avec tout le personnel de CORAPRO. Les champs d'activité et les compétences étaient très complémentaires, et une collaboration pouvait renforcer les capacités de chacun des deux organismes. Le personnel de CORAPRO souhaita unir son destin à celui d'AVN, souhait que les conseils d'administration des 2 organismes entérinèrent, ce qui consacra la fusion par absorption de CORAPRO par AVN au 1er janvier 1996, dans le respect des conventions collectives du travail (CCT 32 bis). Seul le directeur de CORAPRO (J. Van Bosstraeten) qui avait encore le statut de détaché du SCK•CEN, ne vint pas à AVN, préférant retourner au SCK•CEN à un âge proche de la retraite.

Depuis 1996, AVN contrôle tous les établissements de classe 1 (sauf l'IRMM et la FBFC – contrôlés par AVC), une bonne partie d'établissements de classe 2 et quelques installations de classe 3.

C. Controlatom

Controlatom devint AIB-Vinçotte Controlatom (AVC) à la suite de la fusion entre AIB et Vinçotte en 1990 et vint s'établir dans les locaux de Vinçotte à Forest.

Les services de support (HRM, finance, informatique, etc.) fut assuré par le Groupe AV, mais la gestion de son personnel, l'édition des rapports et la gestion technique des activités ne furent pas affectées.

Son directeur, Jean Delhove, prit sa retraite en 1996. Il fut remplacé par Christian Ballaux, lui-même pensionné en 2003 et remplacé par Koen Persyn.

En 2002, AVC acheta un terrain à Vilvorde sur lequel le groupe Vinçotte fit construire un nouveau bâtiment, où les services généraux du Groupe, logés précédemment à Auderghem et à Forest, furent rassemblés. AVC déménagea vers ce nouveau site en février 2004.

Depuis 1998 les deux activités traditionnelles d'AVC, à savoir le contrôle physique et la dosimétrie, ont été étendues par un service de contrôle de radiophysique médical. Les hôpitaux faisant appel à ce nouveau service ont pu se rendre conformes aux exigences de l'arrêté royal du 20 juillet 2001 relatives aux applications dans le domaine de la médecine nucléaire et la radiographie sans devoir engager du personnel supplémentaire. Ce service a été agréé comme un des premiers en Flandre pour effectuer des essais physico-techniques pour des organisations qui voulaient entreprendre des mesures mammographiques dans le cadre de programme de détection de cancers du sein.

AVC était la première organisation qui acquérait toutes les agréations nécessaires pour pouvoir offrir tous les services dans le domaine de la

radioprotection. À ce moment AVC possède le plus grand service de métrie et du radio physique médical.

AVC a participé pendant quelques années aux réunions du Comité scientifique et technique créé par AVN. AVC y présentait son rapport annuel et ce rapport était discuté au sein de ce comité, en présence des représentants d'AVN. Après quelques années AVC conclut que la valeur ajoutée de ces discussions était peu bénéfique pour ses activités et décida de ne plus participer aux réunions de ce comité.

AVC a continué de poursuivre une politique de rendre un service de qualité maximal aux exploitants. Ceci a été rendu possible d'une part par l'embauche de personnel avec qualification élevée et par sa formation continue par des programmes internes et externes. D'autre part AVC s'est investi dans du conseil aux exploitants dans le cadre de la politique ALARA.

D. AVN

Lors du projet de fusion AIB-Vinçotte au début 1990, le département de Sûreté nucléaire de Vinçotte (SNV) allait former à lui seul AIB-Vinçotte Nucléaire, puisqu'il n'y avait pas d'activités proprement nucléaires à AIB. Le personnel d'AVN représentait à peine 5 % du total du personnel du Groupe AV et de ce fait les exigences spécifiques au domaine nucléaire risquaient de ne pas recevoir la priorité nécessaire. C'est pourquoi Pierre Govaerts proposa la création d'un « Comité Scientifique et Technique » (CST) qui évaluerait chaque année la qualité du travail d'AVN et pourrait être composé de représentants des autorités de sûreté des pays voisins et d'organisations internationales, ainsi que de personnalités scientifiques nucléaires belges.

Cette proposition fut acceptée par la Direction de Vinçotte, juste avant la création officielle d'AVN en juillet 1990. La première personnalité étrangère contactée fut Pierre Tanguy, qui avait dirigé l'Institut de protection et de sûreté nucléaire et était à ce moment Inspecteur général de la sûreté nucléaire à électricité de France. Il trouva cette initiative intéressante et apporta son soutien lors des contacts avec d'autres personnalités étrangères. La première réunion du CST eut lieu en mai 1991, présidée par P. Tanguy.

Succédant à H. Dopchie comme Directeur d'AVN le 1er décembre 1990, Pierre Govaerts choisit de concentrer AVN sur les tâches de contrôle et de surveillance à caractère réglementaire au sens large, i.e. analyse de sûreté, inspections, retour d'expérience, R&D et support.

Le département SNV avait en effet développé des activités de service aux exploitants des centrales nucléaires, effectuant les mesures d'efficacité des filtres à charbon actif et mettant à disposition du personnel en

complément au service de radioprotection de la centrale pendant les arrêts de tranche. Ces tâches étaient effectuées jusqu'en 1990 en partie par du personnel de SNV et en partie sous-traitées à d'autres départements de Vinçotte, dont certaines personnes avaient été formées dans ce but.

Pour AVN, devenu une entité indépendante, il s'agissait d'éliminer tout ce qui de l'extérieur aurait pu apparaître comme une source potentielle de conflit d'intérêts entre les activités de type réglementaire et des activités de service aux exploitants, ce qui conduisit logiquement à l'abandon de ces dernières, qui furent reprises par AIB-Vinçotte.

Le personnel concerné fut transféré, après accord individuel, de AVN vers AV, et AVN fit don à AV de tout le matériel de mesures et de tout le savoir-faire développé dans ces domaines.

Lors de la fusion d'AIB et de Vinçotte, leurs conseils d'administration respectifs furent réunis en un seul, sous la présidence du Baron Jaumotte, venant de Vinçotte, et du Général Renson, venant d'AIB. Le conseil d'administration était le même pour toutes les entités du Groupe AV, mais seule la direction générale d'AIB-Vinçotte y assistait régulièrement. Celle-ci considérait les autres entités du Groupe AV plutôt comme des « départements » sous son autorité que comme des entités indépendantes, et intervenait dans les décisions d'investissement et dans la politique salariale. Pour les organismes agréés « nucléaires » (article 74 de l'arrêté royal du 28/2/1963), chaque expert doit être agréé au niveau individuel et doit pour ce faire répondre à des critères de diplômes et de formation complémentaire. Ceci conduit à des durées de formation longues et à une politique salariale visant à la stabilité du personnel, au lieu d'une politique de rotation visant à minimiser les salaires.

De plus, l'uniformisation des systèmes informatiques d'AIB et de Vinçotte fut réalisée sans prendre en compte les spécificités du travail des différentes entités, en particulier la gestion de projets s'étendant sur des périodes longues.

AVN dut donc développer son propre programme de gestion des imputations de son personnel, afin de pouvoir facturer les prestations effectuées.

Invité pour la première fois à présenter les activités d'AVN devant le conseil d'administration en novembre 1992, Pierre Govaerts fit part de ces difficultés dans le support logistique fourni par le Groupe AV, ce qui déplut à certaines personnes.

En janvier 1993, les augmentations salariales prévues par la direction d'AVN pour son personnel furent refusées au niveau du Groupe AV. Lassé de toutes ces interférences, le personnel d'AVN décida à l'unanimité d'agir contre ce refus. De plus, le personnel informa de la situation la Commission de surveillance, présidée par un représentant des Administra-

tions de tutelle (i.e. le directeur du Service de la sûreté technique des installations nucléaires, au Ministère de l'emploi et du travail), rappelant que les Administrations avaient considéré en 1990 qu'AVN était un nouvel organisme indépendant, qui ne succédait pas automatiquement à Vinçotte, et qui avait dû demander un nouvel agrément.

Ces actions furent immédiatement connues du conseil d'administration : le Baron Jaumotte se rendit compte de la gravité de la situation et un groupe de travail fut créé pour examiner les questions litigieuses et proposer des solutions.

Il en résulta la création d'un conseil d'administration (CA) spécifique pour AVN, composé de quelques personnes aussi membres du CA du Groupe AV et de personnalités scientifiques « nucléaires » (les Professeurs J. Devooght (ULB), P. De Meester (KUL), J. Vereecken (VUB) et W. Vinck, ancien chef du Service de Sûreté nucléaire à la CCE, dont la présidence fut assurée par le Baron Jaumotte, qui renonça ensuite à toute fonction au sein du Groupe AV.

L'indépendance d'AVN fut reconnue et toute interférence de la direction d'AV dans la gestion d'AVN éliminée. AVN s'organisa pour effectuer les tâches administratives sous-traitées précédemment au Groupe AV, le seul lien restant étant la localisation à Forest dans les bâtiments ex-Vinçotte.

Il fut aussi proposé aux Administrations de tutelle de nommer un représentant dans ce nouveau CA : le Ministère de santé publique désigna M. J.P. Samain, à l'époque Directeur du SPRI, avec le statut d'observateur.

Au début 1995, la Direction d'AV inscrivit le personnel d'AVN pour participer aux élections sociales pour le Comité d'entreprise du Groupe AV, sans en informer AVN. La réclamation d'AVN ne put être faite dans les délais légaux, et AVN décida de quitter officiellement le Groupe AV et de supprimer toute référence à AIB-Vinçotte en s'appelant dorénavant « Association Vinçotte Nucléaire », appellation plus conforme à son histoire.

Lors de la fusion avec CORAPRO en 1996, trois membres de l'ancien conseil d'administration de CORAPRO entrèrent dans le CA d'AVN.

Comme le personnel d'AVN avait à peu près doublé entre 1990 et la fin de cette décennie, AVN acheta un terrain à Anderlecht et fit construire un bâtiment où il emménagea en avril 2001.

Pierre Govaerts fut pensionné le 1er septembre 2001 et J.J. Van Binnebeek le remplaça comme directeur général. Baron Jaumotte quitta la présidence d'AVN en avril 2002, et devint président honoraire, et Pierre Govaerts lui succéda comme président du conseil d'administration

d'AVN. À ce moment, les deux dernières personnes qui appartenaient aussi au CA du Groupe AV quittèrent le CA d'AVN.

Dans le domaine technique, le travail d'AVN s'est fortement diversifié depuis la fin des années 1980.

Après la mise en service de Doel 4 et de Tihange 3 en 1985, AVN (à l'époque SNV à l'Association Vinçotte) a examiné, à la demande de Tractebel, les critères de sûreté pour la future centrale N8, basée sur le palier français N4 (centrale de Chooz B), mais intégrant les spécificités déjà présentes dans les dernières tranches belges (1 train de sûreté par boucle, double système de protection, très grande séparation physique entre trains de sûreté redondants, etc.). Le projet N8 fit l'objet de nombreuses discussions entre Tractebel / Electrabel et les services de conception d'électricité de France.

Comme les règles de sûreté américaines avaient été utilisées pour les tranches précédentes, il fallait aussi examiner quelles adaptations seraient recommandées pour ce nouveau projet, et quel devrait être le contenu du Rapport de Sûreté. Le projet N8 fut arrêté par la suite, le Gouvernement belge ne paraissant pas prêt à l'autoriser, dans un environnement « post-Tchernobyl » très médiatisé.

AVN continua cependant à s'intéresser aux réacteurs du futur dans le cadre de différents projets. AVN participa aussi, avec l'IRSN et d'autres organismes de sûreté, à établir les principes de sûreté pour de nouveaux réacteurs, en particulier leur résistance à des accidents graves (contrat de recherche sous les auspices du *Nuclear Regulators Working Group* – NRWG – de la CCE – rapport EUR 20163).

De leur côté, les producteurs européens d'électricité nucléaire publièrent, vers la fin des années 1990, le document *European Utility Requirements* (EUR), sorte de cahier de charges pour la construction de centrales nucléaires. Comme les exploitants européens souhaitaient recueillir l'avis d'autorités de sûreté européennes sur le document « EUR », AVN anima un groupe de travail qui examina et commenta un certain nombre de chapitres du document « EUR ». Ce travail ne put malheureusement pas être terminé car les autorités de sûreté qui y participaient eurent d'autres priorités ou ne pouvaient consacrer des moyens à des projets ne correspondant pas à des demandes de leurs exploitants nationaux.

À partir de 1994, l'autorité de sûreté nucléaire (ASN) française invita Pierre Govaerts à participer au « Groupe permanent pour les réacteurs », groupe d'experts français créé en 1973, que l'ASN consulte sur les problèmes de sûreté importants et qui remet avis et recommandations à l'ASN sur les sujets dont il est saisi. De ce fait AVN a pu suivre toutes les discussions sur les critères de sûreté du projet EPR, jusqu'à l'approbation des « Directives techniques » en octobre 2000 et l'examen du « Rapport

préliminaire de sûreté » depuis 2003. Avec la demande officielle d'électricité de France de construire un tel réacteur sur le site de Flamanville, un nouveau cycle d'examen débutera après la publication en mars 2007 du Décret d'Autorisation de création. En 2001 l'ASN a demandé à P. Govaerts de présider ce Groupe permanent pour les réacteurs, ce qu'il a accepté, vu l'intérêt scientifique puisque les centrales nucléaires belges et françaises sont toutes du type PWR (*Pressurized Water Reactors*).

AVN suit aussi les travaux relatifs au concept ADS (*Accelerator Driven Systems*), dont un exemple pourrait être le projet MYRRHA proposé par le SCK•CEN pour succéder au réacteur BR2, ainsi que les réacteurs de 4e génération via la participation EURATOM au *Generation IV International Forum*.

Les études probabilistes de sûreté (EPS) ont été introduites de manière systématique dans les révisions décennales des centrales (*Periodic Safety Reviews*) en ce qui concerne les scénarios de fusion du cœur et leurs conséquences sur la tenue de l'enceinte (EPS niveaux 1 et 1+), tant pour les états en puissance que pour les états d'arrêt. Il est envisagé d'étendre ces études à l'évaluation du terme source correspondant dans l'environnement (EPS niveau 2) et de considérer aussi des initiateurs externes, tels l'incendie ou l'inondation.

Des projets très importants furent le remplacement des générateurs de vapeur dans tous les réacteurs (sauf Doel 1 où c'est prévu vers 2009), couplé ou non avec une augmentation de puissance. Les tubes des générateurs de vapeur fabriqués en inconel 600 ont présenté assez rapidement des corrosions généralisées, avec le risque de fissuration ou de rupture conduisant à des fuites primaire/secondaire et d'éventuels rejets radioactifs dans l'environnement.

La première tranche affectée fut Doel 3 en 1993, avec une augmentation de puissance de 10 %. Il en fut de même pour Tihange 2 et Tihange 1, et pour Doel 4 et Tihange 3 sans augmentation de puissance. Les générateurs de vapeur de Doel 2 furent remplacés en 2004, avec aussi une augmentation de puissance d'environ 10 %.

Si les règles américaines avaient été suivies pour les 4 dernières centrales belges, lors des remplacements des générateurs de vapeur, ce sont les méthodologies développées par les différents constructeurs/fournisseurs qui furent proposées. Il s'ensuivit un travail important d'analyse avant d'approuver ces méthodologies ou d'y faire apporter des modifications, afin de rester cohérent avec les études de sûreté initiales. Par exemple, le changement de la surface d'échange des tubes des générateurs de vapeur modifiait les transferts de chaleur primaire/secondaire, et il est nécessaire de réanalyser un certain nombre de transitoires/incidents/accidents étudiés dans les Rapports de sûreté.

Un autre projet important a été la rénovation du réacteur BR2 au SCK•CEN : remplacement de la matrice en béryllium qui avait atteint son taux d'irradiation maximum, remise à niveau de nombreux systèmes et composants, tenue au séisme, protection incendie, etc.

Dès 1993, dans le cadre au départ de contrats de recherche CE, AVN a collaboré avec l'ONDRAF sur les critères de sûreté des sites de stockage de déchets radioactifs. Ce travail s'est poursuivi dans une collaboration franco-belge entre autorités de sûreté avec leur support technique (IRSN et AVN) et les organismes chargés de la gestion des déchets (ANDRA en France, ONDRAF en Belgique).

Le document final énonçant les grands principes de sûreté proposées a été présenté à la Communauté internationale lors d'un séminaire à Bruxelles en mai 2005.

Pour les systèmes de traitement de déchets produits dans les installations, AVN a continué son travail de contrôle en Belgique (contrôles nucléaires, IRE, Belgoprocess, etc.).

L'autorité de sûreté nucléaire néerlandaise, la KFD, a demandé de la soutenir dans leurs inspections et dans certaines analyses de sûreté liées à leurs centrales de Borssele et Dodewaard ainsi que leur réacteur de recherche à haut flux à Petten. AVN continue cette activité jusqu'à ce jour.

Dans le but de mieux définir les termes de la nécessaire collaboration entre l'AFCN et les OA, beaucoup d'espoirs avaient été mis dans la mission du Professeur Deconinck en 2006. Le rejet de ses conclusions par l'AFCN en octobre 2006 a créé chez le personnel d'AVN un profond sentiment d'insécurité quant à son avenir.

Comme le travail en AVN est à mi-chemin entre l'académique et l'ingénierie industrielle, à un moment où Electrabel-Suez a lancé une vaste campagne de recrutement, l'éventail des possibilités d'évolution de carrière est très large. Certaines personnes d'AVN, lassées d'attendre une hypothétique solution, ont décidé de prendre leur destin en main et ont choisi un emploi plus stable à leurs yeux. C'est ainsi qu'AVN a perdu en un an environ 30% de son personnel technique. Une partie seulement (un tiers) est allée à l'AFCN, qui poursuit une campagne de recrutement intensif. Cela crée une dislocation des équipes existantes, ce qui nuit évidemment à l'efficacité du travail et détruit des synergies. Il faut recruter et former du nouveau personnel, ce qui est malaisé dans un climat d'incertitude sur l'avenir. Aussi, plus ou moins inconsciemment, certains détériorent et mettent à mal l'expertise et le renom international d'AVN laborieusement construits depuis près de 40 ans.

III. La coopération internationale en sûreté nucléaire

A. L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA)

Le statut de l'AIEA prévoit que cet agence peut développer des règles de sûreté, que les pays membres seront libres d'utiliser ou non, mais qui ont un caractère obligatoire dans le cadre de contrats d'assistance de l'AIEA au bénéfice d'un pays membre.

Avec l'aide d'experts des pays membres, l'AIEA écrivit dans les années 1980 un assez grand nombre de codes et de guides de sûreté, ainsi que beaucoup de documents techniques de support. Devant le développement quelque peu anarchique de ces activités, l'AIEA créa en 1995 quatre comités chargés de coordonner le travail en sûreté nucléaire (NUSSC), en radioprotection (RASSC), en traitement des déchets (WASSC), en transport de matières radioactives (TRANSSC).

La Belgique désigna un représentant d'AVN pour le NUSSC (P. Govaerts qui en accepta la présidence pendant 2 mandats, c'est-à-dire jusqu'à la fin 2001), et des représentants de l'Administration (actuellement l'AFCN) dans les 3 autres comités.

Le travail des 4 comités est coordonné par la Commission des standards de sûreté, où la Belgique n'est pas présente.

Si les règles de l'AIEA avaient été développées antérieurement comme le consensus minimum acceptable par tous les pays membres, il fut décidé d'en élever le niveau et de les situer en tant que « meilleures pratiques » pour des nouvelles installations, laissant à chaque pays membre la décision de leur degré d'applicabilité aux installations existantes.

Pour le comité NUSSC, la priorité fut donnée aux règles concernant le fonctionnement et la conception des centrales nucléaires, ensuite les réacteurs de recherche et l'évaluation des sites. L'accent est mis depuis 2005 sur les règles relatives aux installations du cycle du combustible. Le NUSSC fut aussi la cheville ouvrière pour le développement des règlements et des guides pour les structures légales et gouvernementales que chaque pays ayant des activités nucléaires devrait mettre en place.

Le comité RASSC a examiné les problèmes de radioprotection rencontrés dans les différents types d'installations, la gestion des sources scellées. Il se penche actuellement sur la révision des normes de base publiées en 1996, en prenant en compte les travaux récents de la CIPR.

Le comité WASSC a beaucoup travaillé sur les critères d'exemption et de libération et a développé les règles et guides sur l'entreposage, le démantèlement, le traitement des déchets dans les diverses installations.

Le comité TRANSSC a approuvé en 1996 la dernière version du règlement des transports et examine les modifications éventuelles à y apporter au vu du retour d'expérience.

La liste des règles et guides de sûreté, publiées et en cours de développement, est disponible sur le site internet de l'AIEA.

En 1993, l'AIEA publia les critères fondamentaux de sûreté pour les centrales nucléaires, qui étaient déclinés suivant 25 principes fondamentaux. Ce texte servit de base à la Convention sur la Sûreté nucléaire, dont le champ d'application a été limité aux centrales nucléaires. Cette Convention, ayant été ratifiée par un nombre suffisant d'États, dont la Belgique, entra en application en 1997. Chaque Partie contractante s'y engage à expliquer, dans son Rapport national, comment elle satisfait aux différents articles de la Convention. Les Rapports nationaux sont distribués à toutes les Parties contractantes et peuvent faire l'objet de questions qui seront débattues lors des réunions des Parties contractantes, qui se tiennent tous les 3 ans.

AVN coordonna l'élaboration du premier rapport national, avec des contributions d'Electrabel et de Tractebel, projet de rapport qui fut ensuite soumis pour examen et approbation à l'AFCN, et rendu officiel par le Gouvernement à l'automne 1998 en vue de la réunion d'avril 1999.

Les articles 7 et 8 de la Convention sont relatifs au contrôle et à la surveillance de la sûreté nucléaire. L'AFCN agit en tant qu'autorité de sûreté nucléaire ayant le pouvoir d'injonction et pouvant promulguer des règles ou des instructions. Elle délègue à AVN le contrôle permanent des activités de l'exploitant, ce qui comprend l'inspection, l'analyse de sûreté des installations (révisions périodiques et modifications), le retour d'expérience. Le rôle de l'organisme réglementaire (« *regulatory body* ») est ainsi assuré par le tandem AFCN-AVN. À partir du troisième Rapport national (réunion de 2005), l'AFCN a repris le rôle de coordination pour l'établissement de ce Rapport.

B. L'Agence de l'énergie nucléaire (AEN) de l'OCDE

La Belgique participe à un assez grand nombre de programmes de recherche patronnés par le Comité de Sûreté des Installations Nucléaires (CSIN) de l'AEN.

- Étude du comportement des combustibles et des matériaux :
  - HALDEN Reactor Project.
- Évaluation des « softwares » (contrôles informatisés, interfaces homme-machine, organisation des tâches) :
  - HALDEN Reactor Project (Phénoménologie des accidents graves).

- Phénoménologie des accidents graves :
  - En cuve : MASCA.
  - Hors cuve : MCCI, rétention des produits radioactifs dans les générateurs de vapeur.
- Rétention des produits radioactifs dans les générateurs de vapeur :
  - ARTIST (géré par le Paul Scherrer Institute, hors CSNI) : Simulation de phénomènes thermohydrauliques multi-fluides.
- Simulation de phénomènes thermohydrauliques multi-fluides :
  - PKL, SETH, ROSA.
- Comparaison des méthodologies de « Risk-informed in service inspections » :
  - RISMET.
- Étude de la propagation des incendies :
  - PRISME.

AVN participe au groupe de travail consacré à l'analyse des risques et aux études probabilistes de sûreté. AVN informe ce GT sur les résultats des réunions annuelles qu'AVN organise sur l'utilisation des études probabilistes dans les analyses des incidents survenus dans les centrales nucléaires (PSA Event Analysis).

Un autre domaine d'intérêt est le suivi des structures (métalliques et de génie civil) et les phénomènes de vieillissement associés, ainsi que le développement de banques de données sur la probabilité de défaillance de certains composants (p.ex. les tuyauteries).

Dans le cadre du Comité des activités nucléaires réglementaires (CANR), AVN a pris une part très active à l'élaboration en 1998 du rapport « *Future Regulatory Challenges* ». La libéralisation du marché de l'électricité peut induire chez les exploitants une recherche de performances accrues, de rendement plus élevé, de marges de sûreté réduites, d'allongement de la durée de vie des installations. Il est nécessaire d'évaluer les implications de telles démarches potentielles sur la sûreté : AVN était en charge de l'écriture du chapitre du rapport consacré à ces problèmes techniques.

D'autres activités liées au CANR sont celles du Groupe de Travail sur les pratiques d'inspection, dont la présidence fut longtemps assurée par AVN.

Le Groupe de Travail sur le retour d'expérience examine quelles leçons on peut tirer des incidents survenus dans les centrales nucléaires et exploite pour cela les données rassemblées dans l'IRS (*Incident Reporting System*) développé à l'origine par l'AEN et géré maintenant conjoin-

tement avec l'AIEA. AVN représente la Belgique dans le système IRS. AVN analyse ces incidents pour remonter à leurs diverses causes possibles, et examine aussi comment l'incident aurait pu évoluer en cas de défaillances supplémentaires ou d'autres conditions initiales (questions du type *what if* ?). Ces analyses sont introduites dans la banque de données ARIANE de retour d'expérience, développée par AVN.

AVN suit aussi les travaux du Comité sur les déchets radioactifs et du Comité des sciences nucléaires.

C. Les groupes de travail « Sûreté nucléaire » à la Commission européenne

1. L'harmonisation par consensus

Dans sa résolution du 22 juillet 1975, le Conseil des ministres avait souligné l'importance de la coopération et de l'harmonisation en matière de sûreté nucléaire entre les pays membres. La Commission européenne avait créé en 1972 un Groupe de travail (*Reactor Safety Working Group*) composé des autorités de sûreté et des organismes de contrôle associés, des exploitants des centrales nucléaires et de leurs bureaux d'étude, de constructeurs. En parallèle, à partir de la fin des années 1980, les autorités de sûreté et les organismes de contrôle associés se réunirent pour traiter de leurs problèmes spécifiques au sein du NRWG (*Nuclear Regulators Working Group*), tout en continuant à participer aux réunions plénières.

Ces Groupes de travail comparèrent les pratiques des pays membres sur des sujets qu'ils définirent eux-mêmes comme prioritaires et atteignirent ainsi, à des degrés variant entre les sujets, une « harmonisation par consensus ».

C'est ainsi que les révisions périodiques de sûreté, pratiquées initialement en Allemagne / Belgique / Grande-Bretagne, se généralisèrent à l'ensemble des pays européens et leurs principes et leur philosophie générale firent l'objet de plusieurs rapports du NRWG (rapports EUR 13056, EUR 15555). Cette notion fut reprise ensuite dans les guides de sûreté de l'AIEA.

D'autres sujets examinés furent les conséquences radiologiques des accidents de référence, pour lesquelles certaines doses calculées pouvaient différer d'un facteur cent mille à cause du degré de conservatisme des hypothèses de calcul. Ceci conduisit à des propositions d'hypothèses plus réalistes, tout en restant conservatives.

Citons encore les critères de qualification de méthodes d'examens non destructifs ou les méthodes de qualification des logiciels :

- EUR 16802 : *Common position of European regulators on qualification of non destructive testing (NDT) systems for pre- and in-service*

inspection of LWR components, auquel les industriels répondirent à travers les travaux de « l'*European Network for Inspection Qualification* » (ENIQ) ;

- EUR 19265 : *Common position of European nuclear regulators for the licensing of safety critical software for nuclear reactors*.

La Commission souhaita faire établir une synthèse du travail accompli depuis la création du Groupe de travail : le rapport produit en l'an 2000 par un consultant extérieur fut jugé insuffisant par les membres du NRWG.

Ayant participé le plus longtemps aux travaux du NRWG, le représentant d'AVN offrit d'établir un projet de rapport, texte qui fut entériné par le NRWG en 2002 et publié comme rapport EUR 20818 : *Thirty years of NRWG activities towards harmonization of nuclear safety criteria and requirements*.

En 2005, après l'élargissement de la Communauté européenne et la réaffectation de personnes au sein de la Commission, celles-ci décidèrent de faire table rase du passé et le NRWG ne fut plus réuni pour des raisons administratives restées obscures. Le travail en cours fut repris sous l'égide de WENRA. Alors que les services de la Commission ont collaboré pendant plus de 30 ans avec les experts en sûreté des pays membres et profité de leur expérience, sans frais notables pour la Commission, le choix actuel de la Commission paraît être difficilement compréhensible.

2. L'assistance nucléaire aux pays de l'Est

Après la chute du mur de Berlin et l'ouverture des anciens pays d'Europe de l'Est vers l'Union européenne, la sûreté des centrales nucléaires situées dans ces pays fait l'objet de programmes d'assistance de l'Union européenne (programmes Phare et Tacis), tant pour le soutien des autorités de sûreté que pour l'aide matérielle aux exploitants.

Afin de juger des besoins des autorités de sûreté de chaque pays, des membres du NRWG participèrent à des missions exploratoires et développèrent des questionnaires relatifs aux différents domaines que doit couvrir l'autorité de sûreté. Ces questionnaires furent entre autres utilisés ultérieurement par l'AIEA pour établir des critères d'examen quand elle lança le programme IRRT (*International Regulatory Review Teams*).

AVN participa dès le début (1991) aux programmes Phare et Tacis d'assistance aux autorités de sûreté et leurs *Technical safety organisations* (TSOs) de nombreux pays de l'Est. Ces programmes avaient pour but de soutenir ces Autorités et leurs TSOs dans leurs efforts d'améliorer leurs organisations, lois et règles nucléaires, méthodes d'inspection, formation, plan d'urgence, leurs méthodologies de travail ainsi que leurs analyses de sûreté nécessaires pour évaluer et autoriser les modifications

des centrales nucléaires de leur pays. Ceci commença en 1991 par l'examen de sûreté de la centrale de Kozloduy en Bulgarie. Dans un passé plus récent AVN a également contribué aux développements de règles et pratiques dans le cadre de démantèlement des centrales nucléaires ainsi que la gestion des déchets radioactifs. AVN a contribué à l'analyse de sûreté d'un stockage définitif de déchets de basse et moyenne activité et à courte demie-vie pour les déchets provenant de la centrale nucléaire de Tchernobyl. Par sa participation à ces programmes Phare et Tacis, AVN a renforcé ses liens avec les autorités de sûreté et leurs TSOs dans les pays de l'Union européenne ainsi qu'avec leurs homologues dans les pays de l'Est.

De leur côté, Tractebel et Electrabel participèrent à des programmes d'aide directe aux exploitants, par exemple par le biais de partenariats entre un exploitant « occidental » et un exploitant « oriental ».

Pour mieux structurer et évaluer les résultats des programmes d'assistance, la Commission européenne établit en 1992 le *Regulatory Assistance Management Group* (RAMG) formé de représentants des autorités de sûreté et des organismes de contrôle associés provenant des pays occidentaux. Le RAMG donne son avis sur le contenu des futurs contrats d'assistance et évalue ensuite les résultats obtenus et les progrès accomplis. La présidence du RAMG est assurée par un représentant d'un pays membre représenté dans le RAMG. M. Maris d'AVN a accepté d'assurer cette fonction depuis fin 2003 pendant deux mandats de 2 ans.

Au moment d'accueillir en son sein des représentants des autorités de sûreté des pays d'Europe de l'Est, le NRWG établit un document (EUR 16243 : *Establishing an effective nuclear safety regulatory regime* – 1995) décrivant le travail d'une autorité de sûreté « occidentale » (ceci donc bien avant l'écriture à l'AIEA des règles relatives à *Legal and Governmental Infrastructure* produites en l'an 2000). Ce document NRWG fut l'objet de présentations et de discussions avec les représentants des pays d'Europe de l'Est. Dans le but de pérenniser ces échanges d'informations, la Commission créa en 1992 le groupe de travail « CONCERT » composé des autorités de sûreté de l'Est et de l'Ouest. Les réunions « CONCERT » se focalisèrent sur l'étude des diverses tâches d'une autorité de sûreté, avec des exemples concrets d'application présentés par des pays de l'Est et de l'Ouest. M. Maris d'AVN a participé aux réunions et a contribué aux sujets en discussion.

Vu l'existence du groupe « CONCERT », le NRWG se concentra à nouveau sur les problèmes techniques qui intéressaient ses membres.

Comme pour le NRWG, la Commission européenne suspendit les réunions « CONCERT » en 2005.

3. Les Directives sur la sûreté nucléaire et sur les déchets

Depuis 2002, la Commission européenne a en projet deux Directives : l'une sur la sûreté nucléaire, l'autre sur le stockage des déchets radioactifs.

La Directive sur la sûreté nucléaire reprenait les principes généraux de la Convention pour la sûreté nucléaire de l'AIEA, afin de les rendre obligatoires pour les pays de l'Union européenne, et étendait le champ d'application à toutes les installations nucléaires au lieu des centrales électronucléaires, avec un rapport national tous les ans au lieu de tous les 3 ans.

Ce projet fut combattu par de nombreux pays membres (dont la Belgique, par la voix de l'AFCN), qui doutaient de la valeur ajoutée et craignaient un surcroît de bureaucratie, et fut l'objet de multiples amendements au Parlement européen. Il fut finalement décidé par les Chefs d'état de créer au niveau du Conseil européen le « *Working Party on Nuclear Safety* » (WPNS), chargé de faire l'état des lieux de la sûreté nucléaire dans l'Union européenne et de faire des propositions pour la fin 2006.

Le représentant belge dans le WPNS est l'AFCN, qui fait appel à AVN comme support technique.

Dans le projet de Directive sur le stockage des déchets radioactifs, la Commission voulait que chaque pays dispose, avant 2020, d'un centre de stockage géologique pour les déchets hautement radioactifs. Une date limite paraissait irréaliste à plusieurs pays et ce projet de Directive fut aussi l'objet de multiples amendements. Il en sera à nouveau débattu après la discussion sur la Directive sûreté nucléaire.

4. WENRA

Dans la perspective de l'adhésion à l'Union européenne de dix nouveaux pays provenant de l'Europe de l'Est, le degré de sûreté de leurs installations nucléaires était un élément capital dans la décision.

Le directeur général du Directorat général de la sûreté et de la radioprotection (DGSNR) en France, A.C. Lacoste, proposa à ses collègues de créer l'association WENRA (*Western European Nuclear Regulators Association*) dont *la première tâche serait de faire une évaluation objective et indépendante de la sûreté nucléaire dans les pays candidats à l'adhésion*, et d'en fournir les résultats à la Commission européenne.

Cette association fut fondée officiellement en novembre 1998. La Belgique y fut représentée par l'AFCN, avec le support technique d'AVN. Comme les pays « nucléaires » occidentaux avaient participé à de nombreux programmes d'assistance bilatéraux et/ou multilatéraux, beaucoup d'informations étaient disponibles mais il fallait les rassembler

et en faire la synthèse, et le travail fut réparti entre les pays occidentaux, avec un pays « occidental » responsable pour un pays « oriental », en fonction des connaissances de chacun. Ainsi AVN (M. Maris) participa à l'évaluation de la Slovaquie et la Bulgarie.

WENRA publia un premier rapport en 1999, qui fut présenté et discuté avec les pays candidats à l'adhésion, et un rapport définitif en octobre 2000

Ce travail terminé, WENRA se pencha sur *l'harmonisation des critères de sûreté entre les pays européens* pour les centrales nucléaires et pour le traitement des déchets.

Pour la sûreté des centrales nucléaires, un groupe de travail fut constitué qui sélectionna 6 sujets jugés les plus importants comme étude pilote de mise au point de la méthode de travail. Pour chaque sujet, les exigences de sûreté dans les pays participants étaient analysées et des niveaux de référence furent définis, qui correspondaient à au moins 75 % du niveau des exigences les plus élevées. Ces niveaux de référence furent comparés aux règles et guides de sûreté de l'AIEA, dans un souci de cohérence et d'exhaustivité. Pour chaque niveau de référence ainsi défini, chaque pays examinait si ce niveau était présent dans sa réglementation et quel était son degré d'implémentation dans les centrales du pays. De manière générale, on remarqua que peu d'exigences étaient reprises dans la réglementation belge mais qu'un grand nombre était rencontré en pratique.

Comme l'étude pilote avait montré que la méthodologie proposée était applicable et rationnelle, WENRA décida de l'utiliser pour les autres sujets considérés comme importants par les pays participants. Douze nouveaux sujets furent ainsi introduits, ce qui conduisit à environ 300 niveaux de référence pour l'ensemble des 18 sujets traités.

Chaque pays examina ensuite comment chaque niveau était suivi dans son propre pays, mais les conclusions de chaque pays étaient soumises à un *benchmarking* et discutées, de manière à assurer une cohérence d'appréciation entre tous les pays.

Les résultats pour chaque niveau de référence ont été publiés en début 2006 par WENRA à l'état global pour l'ensemble des pays, laissant à chaque pays le soin de rendre public ou non les résultats propres à son pays.

Ces résultats ont fait l'objet de questions, demandes d'éclaircissement ou de commentaires par les exploitants, regroupés au sein de Foratom, en juin 2006. WENRA a examiné ces remarques et a produit une nouvelle version de son rapport qui sera rendu officiel en 2007.

Au sein de WENRA, les autorités de sûreté de chaque pays se sont engagées à mettre en œuvre cette harmonisation des règles de sûreté pour la fin 2010.

Pour la Belgique, à la demande de l'AFCN, AVN a participé aux travaux du Groupe de travail et a effectué toute l'analyse correspondante. Les résultats ont été présentés par l'AFCN et AVN aux exploitants belges pendant le premier semestre 2006 et des discussions plus approfondies sont prévues sur l'évaluation faite pour chaque niveau de référence.

Comme pour d'autres pays, les niveaux de référence sont souvent bien implémentés dans la pratique, mais n'apparaissent pas dans la réglementation. Un gros travail de mise à jour de la réglementation devra être fait par l'AFCN, avec le soutien technique d'AVN, pour atteindre l'objectif de 2010.

Lors de la réunion WENRA de Novembre 2006, la Belgique (tout comme les autres pays) a présenté son Plan d'action national, aussi bien pour l'aspect réglementaire que pour l'aspect de l'implémentation. Ce Plan d'action a été élaboré par un effort commun de l'AFCN, AVN, Electrabel et Tractebel Engineering.

L'analyse des problèmes relatifs aux déchets est encore à un stade moins avancé.

PARTIE VI

CONTEXTE POLITIQUE ET INSTITUTIONNEL

Le Forum nucléaire belge

Informer en toute transparence

Marcel GAUBE

Président du Forum nucléaire belge

I. Mission du Forum nucléaire belge

Le Forum nucléaire belge s'est donné pour mission d'informer les médias, le monde politique et le grand public. *De facto*, retracer son histoire et ses initiatives, c'est remonter le temps au fil des grands dossiers nucléaires belges et internationaux...

Constitué en 1972, le Forum nucléaire belge est une association sans but lucratif regroupant la plupart des sociétés et organismes actifs dans le domaine des applications pacifiques de l'énergie nucléaire. Les membres du Forum nucléaire belge en 2006 étaient Agoria (chapeautant AMEC SPIE TS, AIB-Vinçotte, ALSTOM, Ateliers de la Meuse, Câblerie d'Eupen, CEGELEC, FABRICOM, IBA et Siemens), Belgatom, Belgonucleaire, Belgoprocess, Electrabel, FBFC International, IISN, IRE, Laborelec, MPE, SCK•CEN, SPE, Synatom, Tecnubel, Transnubel, Transrad et Westinghouse Electric Belgium.

Initialement, et pendant une demi-douzaine d'années, le Forum a d'abord été une association réellement professionnelle, favorisant les contacts principalement entre des ingénieurs, des gestionnaires, des scientifiques et des diplomates amenés, via leur activité, à être concernés par le nucléaire et ses applications.

II. Informer les médias et le monde politique

Vers la fin des années 1970[1], pourtant, le Forum opère une redéfinition de ses objectifs. Dès ce moment, son but principal devient le soutien

[1] Cette contribution traite une période plus étendue que celle couvrant 1990 à 2005 pour la bonne raison que le tome précédent de cet ouvrage ne consacrait pas de contribution au Forum.

au développement du nucléaire en Belgique et de ses applications énergétiques.

Le moyen d'action privilégié retenu est l'information du grand public, plus particulièrement en touchant les médias. Progressivement, le Forum commencera également à s'adresser au monde des décideurs politiques.

Ce qui aujourd'hui, dans un monde où la communication est omniprésente et même parfois envahissante, peut paraître simplement normal est à l'époque novateur. Ce l'est encore plus singulièrement dans le monde du nucléaire.

Assez logiquement, les actions du Forum nucléaire vont dès lors suivre le cours des dossiers qui font l'actualité de la technologie nucléaire en Belgique. Ce sera le cas pour l'organisation des séminaires et des visites de formation à l'attention de la presse et du monde politique mais aussi pour la publication du bulletin d'information « Actualité nucléaire » dont une soixantaine de numéros ont été diffusés largement au public, aux médias, aux milieux universitaires, au monde politique belge, aux forums étrangers et à Foratom (chaque numéro est diffusé à près de 2000 exemplaires, en français et en néerlandais).

Les thèmes des séminaires et visites sont, bien entendu, déterminés par l'évolution de l'actualité mais aussi par les demandes d'information de journalistes et parlementaires. Beaucoup de journalistes spécialisés ou moins spécialisés ont par ce biais constitué leur background technique mais aussi nourri leur réseau relationnel ou informationnel lors de ces rencontres, souvent organisées sous forme de séjours résidentiels incluant de nombreuses visites, souvent exclusives. Les journalistes ont ainsi pu accumuler une précieuse connaissance, constituer une documentation et étoffer leur carnet d'adresses. De leur côté, les médias audiovisuels ont pu ainsi constituer des bases d'images utiles. À l'époque où ces rencontres étaient essentiellement destinées à la presse, il n'était pas rare que les organisations du Forum rassemblent une cinquantaine de personnes, dont une moitié constituée de professionnels de la presse.

Tableau 1 : Visites et séminaires organisés par le Forum nucléaire belge, pour la presse et le monde politique belge

Lieu	Date	Sujets
Avignon (France)	Février 1977	Panorama des différents aspects de l'énergie nucléaire
Wépion (Belgique)	Juillet 1977	Le nucléaire dans le monde et la politique de l'énergie nucléaire
Mol-Dessel (Belgique)	Novembre 1977	Le cycle du combustible
Mons (Belgique)	Mai 1978	Les énergies 'alternatives'
Marcoule (France) et Asse (Allemagne)	Décembre 1979	L'aval du cycle du combustible

États-Unis	Juin 1980	Les leçons de Three Mile Island : 1 an après
La Hague (France)	Décembre 1980	Le retraitement du combustible usé
Limoges (France)	Juin 1981	Ressources en uranium + Traitement et conversion de l'uranium
Doel (Belgique)	Septembre 1981	Visite de la centrale
Chalon-sur-Saône – Bugey (France) et Almeria (Espagne)	Mai 1982	Fabrication d'équipements nucléaires et formation d'opérateurs de centrales nucléaires + Utilisation de l'énergie solaire et ses possibilités en Europe
Vienne (Autriche)	Septembre 1982	Mini-séminaire « Conférence AIEA sur l'expérience acquise dans le domaine nucléo-énergétique »
Paluel (France)	Mai 1983	Construction de centrales
Tihange (Belgique)	Décembre 1983	Visite de Tihange 2
Mouscron-Duffel-Huy (Belgique)	Octobre 1984	Électrothermie
Bruxelles-Fleurus (Belgique)	Octobre 1985	Applications non énergétiques de la physique nucléaire
Avignon-Lyon (France)	Octobre 1986	Le nucléaire après Tchernobyl et visite à Superphénix et Eurodif
Londres-Manchester (Angleterre)	Octobre 1987	Décision de la construction de Sizewell B (1300 MW)
Nivelles, Charleroi, Liège, Dessel (Belgique)	Mai 1988	Les activités nucléaires des constructeurs
Toulouse (France)	Novembre 1988	La pollution de l'eau et de l'air et la production de l'électricité
Mol-Dessel (Belgique)	Novembre 1989	Déchets nucléaires
Chooz (France)	Octobre 1990	Les centrales de Chooz
Prague (Tchécoslovaquie)	Octobre 1992	L'énergie nucléaire en Tchécoslovaquie + Participation belge au programme d'extension du site de Temelin
La Hague (France)	Octobre 1993	Retraitement du combustible irradié et utilisation du MOX dans les centrales nucléaires
Vienne (Autriche)	Avril 1996	Conférence internationale de l'IAEA : « Dix ans après Tchernobyl : récapitulation des conséquences radiologiques de l'accident »
El Cabril (Espagne)	Avril 1997	Stockage en surface des déchets radioactifs de faible activité
Gorleben (Allemagne)	Avril 1998	Stockage définitif des déchets radioactifs dans un dôme de sel
Nice (France)	Octobre 1998	ENC '98 : Conférence internationale sur l'énergie nucléaire
Anvers (Belgique)	1999	Accueil des journalistes belges et étrangers invités à la conférence TOPSEAL consacrée à la gestion des déchets radioactifs

Bruxelles (Belgique)	2000	Accueil des journalistes belges et étrangers invités à la conférence PU 2000 consacrée à l'utilisation du plutonium comme combustible nucléaire
Culham (Angleterre)	2001	Organisation, pour la presse belge, d'une visite du « JET (*Joint European Torus) Service Center* » consacré à la recherche sur la fusion thermonucléaire
Bruges (Belgique)	Octobre 2001	Participation à la conférence internationale ICEM 01 consacrée à la gestion de l'environnement et des déchets radioactifs
Lille (France)	Octobre 2002	Organisation de la visite de parlementaires belges à la journée « *European Energy Event* » organisée dans le cadre de l'ENC 2002
Belgique	2002 et 2003	Le Forum nucléaire belge a poursuivi ses activités d'information sur l'option nucléaire et a notamment répondu aux nombreuses demandes d'informations émanant de journalistes et de parlementaires dans le cadre des discussions, au Parlement et au Sénat, du projet de loi sur la sortie du nucléaire
Olkiluoto (Finlande)	Décembre 2004	Organisation, pour les parlementaires fédéraux et régionaux et pour les journalistes, de la visite du site d'Olkiluoto où est construite la nouvelle centrale nucléaire finlandaise, un EPR (*European Pressurized water Reactor*) de 1600 MWe
Paris – Tricastin – Marcoule (France)	Décembre 2005	Organisation de la participation de parlementaires fédéraux et de journalistes à la 'European Nuclear Conference 2005' + Visite d'Eurodiff (enrichissement d'uranium, Tricastin) + Présentation du Commissariat à l'énergie atomique et du Centre de Marcoule (visite des installations Atalante, Phénix et Visiatome)
Cernavoda – Pistesti (Roumanie)	Octobre 2006	Politique énergétique belge, place du nucléaire dans le mix énergétique + Visites des réacteurs n° 2 et n° 3 + visite de l'usine de fabrication de combustible nucléaire

Si ces séminaires, visites et voyages d'étude suivaient l'actualité, le Forum nucléaire belge a pris le temps, à plusieurs reprises, d'approfondir les sujets difficiles et délicats. C'est ainsi, juste un an après l'accident de Three Mile Island, que le Forum nucléaire était sur place dans le cadre d'un séminaire spécifiquement consacré à cet événement. De même, six mois après Tchernobyl, le Forum nucléaire profitait d'un séminaire à

Avignon-Lyon pour aborder le thème du « Nucléaire après Tchernobyl ». En avril 1996, juste dix ans après l'accident et alors que tous les journalistes consacraient de longs dossiers au thème, le Forum nucléaire belge leur donnait l'opportunité de participer à la Conférence internationale de l'AIEA « Dix ans après Tchernobyl : récapitulation des conséquences radiologiques de l'accident ». C'est ainsi également que des points d'attention étaient portés à l'égard de sujets tels la sûreté nucléaire, la sécurité d'approvisionnement, et évidemment les déchets nucléaires. Ces derniers ont même constitué un thème récurrent des quinze dernières années, induisant beaucoup d'interrogations dans l'opinion publique et politique. Ici aussi, le Forum a, tout au long de son existence, organisé des visites que journalistes et parlementaires n'auraient probablement pu mettre sur pieds eux-mêmes : Anvers-Mol/Dessel (1989), La Hague (1993 – moment où le débat sur le MOX bat son plein), El Cabril (Espagne – 1997), Gorleben (Allemagne – 1998), conférence à Bruxelles (2000) sur l'utilisation du plutonium comme combustible nucléaire, moment où l'actualité mettait en avant cette utilisation du plutonium militaire russe et où la fabrication d'assemblages était envisagée en Belgique.

Bien sûr, une grande partie des activités a été consacrée aux centrales belges. Initialement, effectivement, les séances d'information générales de la fin des années 1970, s'intégraient dans la phase décisive d'investissements qui était alors en cours tant à Doel qu'à Tihange. Les visites du début des années 1980 s'orientent plus sur l'entrée de ces centrales en activité et, progressivement au fil de la décennie, les thèmes auront peu ou prou à voir avec N8 (visite de Sizewell, dernière centrale en construction en Grande-Bretagne en 87, alors que le débat sur N8 est en cours en Belgique, journées thématiques consacrées aux activités des constructeurs belges). Enfin, des visites seront organisées à Chooz (1990) en construction à ce moment avec participation belge et à Olkiluoto (Finlande 2004 – centrale EPR).

Ces dernières années, le Forum a intensifié ses actions en direction des décideurs politiques. C'est ainsi par exemple que des rencontres spécifiques sont organisées lors des voyages d'étude afin de donner aux décideurs la possibilité de contextualiser l'énergie nucléaire dans le cadre des défis énergétiques en Europe et dans le monde.

La loi sur la sortie du nucléaire

Une loi de son époque, amphibologique et en continuel devenir

Ir. Pierre TONON

Membre expert permanent
de la Commission gouvernementale ÉNERGIE 2030

I. La conception

A. Dans l'air du temps de la fin des années 1990

Une loi de son époque, amphibologique et en continuel devenir ! Voir texte de la loi du 31 janvier 2003 (MB du 28 février 2003-9879).

Une loi dans l'air du temps qui fût le résultat d'une évolution inéluctable des opinions politiques balançant entre un fatalisme face à la crainte citoyenne bien ancrée du nucléaire et un volontarisme associé des mouvements et idéaux écologiques. Dans l'air du temps belge, européen et mondial. Examinons de plus prêt et rappelons – nous quelques grandes étapes qui …

B. Quelques étapes et évènements significatifs

Une loi ne naît pas par hasard. Elle est toujours le fruit d'une volonté politique et traduit le plus souvent des évolutions sociétales ou institutionnelles). Dans un état comme la Belgique, le processus législatif, de la conception du projet à la mise en œuvre de la loi, se doit de suivre strictement les règles d'une saine démocratie. La loi sur la sortie du nucléaire s'inscrit pleinement dans cette logique. La publication, à la fin des années 1980 du rapport Brutland et ensuite du plan d'action de la Conférence de Rio sur l'environnement et le développement (1992) ont contribué à conscientiser nos sociétés occidentales à l'absolue nécessité de prendre en compte le facteur écologique dans tous les aspects du développement. Au plan politique, cette tendance s'est concrétisée notamment par l'émergence de partis écologistes un peu partout en Europe occidentale. En

Belgique, les partis Ecolo et Agalev ont progressivement occupé l'avant-scène politique, à telle enseigne qu'en juin 1999, ils furent pressentis pour rentrer dans le gouvernement afin de constituer une nouvelle majorité qui fut ensuite baptisée « la majorité arc-en-ciel ». Une fois en position de gouverner, les partis écologistes ne manquèrent pas de mettre en œuvre leurs engagements fondamentaux, à savoir : développer LA société, entre autre, sans plus faire appel à l'énergie nucléaire. « *Dit was één van de grote strijdpunten van de groene beweging van bij het begin in de jaren zeventig en was nu te lezen in een regeerakkoord.* » (Voir le livre en ligne de Luc Barbé (www.lucbarbe.be) de février 2005 – *Kernenergie in de wetstraat – dissectie van de deals Chap. 3. De uitstap uit de kernenergie*) comme l'évoque Luc Barbé, ancien Chef de cabinet du secrétaire d'État à l'énergie et au développement durable, Olivier Deleuze.

Rappelons donc, ci-après, quelques évènements et étapes importants qui ont contribué à créer, dès la première participation des écologistes à un gouvernement un climat favorable à l'acceptation de leurs exigences drastiques d'abandon de l'énergie nucléaire et de leur détermination à aboutir endéans la législature :

- Les accidents de TMI en mars 1979 et Tchernobyl en avril 1986.
- Les recommandations des commissions parlementaires d'enquête de la Chambre (commission Transnuklear et SCK-CEN) en juillet 1988 et du Sénat (commission Tchernobyl) en décembre 1988.
- La décision du gouvernement en décembre 1988 d'annuler la construction d'une nouvelle unité nucléaire N8 et de créer l'Agence fédérale de contrôle nucléaire.
- L'insistance de la Chambre en juillet 1990, dans une nouvelle résolution, sur la création rapide de l'organisme public de contrôle nucléaire et sur la réforme des organismes agréés.
- La résolution de la Chambre du 22 décembre 1993 en conclusion du débat sur l'utilisation de combustible MOX dans les centrales belges, entérinée quelques jours plus tard par le Gouvernement qui prit à cette occasion, la décision d'instaurer un moratoire de 5 ans sur le retraitement du combustible usé.
- Le recours au Conseil d'État, introduit le 22 juin 1992, par Greenpeace et quelques politiciens locaux, en vue de l'annulation de l'arrêté royal du 10 avril 1991 autorisant la s.a. Belgonucleaire à étendre son usine de fabrication de combustible mixte $UO^2 – PuO^2$ ainsi que l'arrêt du 1er octobre 1998 par lequel le Conseil d'État faisait droit aux requérants.
- La création par la loi du 15 avril 1994 de la nouvelle Agence fédérale de contrôle nucléaire (AFCN / FANC).

- La décision du gouvernement allemand – où participaient les écologistes – en juin 2000, d'arrêter les centrales nucléaires avant leur terme et d'interdire de nouvelles constructions.
- Les attaques terroristes du 11 septembre 2001 qui firent resurgir le spectre du terrorisme nucléaire. Dans le climat de psychose de la fin de cette année 2001, nombre de personnalités belges s'interrogèrent sur la capacité de nos centrales nucléaires à résister à une attaque aérienne.

Le secteur nucléaire ayant connu les turbulences évoquées ci-dessus, le Gouvernement décida, par arrêté royal du 19 avril 1999 de la création de la commission AMPERE (dont question par ailleurs). La Commission aboutit, en octobre 2000, à des conclusions recommandant notamment le maintien de l'option nucléaire. Ces recommandations restèrent toutefois lettre morte face à la détermination de la composante écologiste du gouvernement.

C. Le gouvernement arc-en-ciel Verhofstadt I, ses déclarations et premières actions[1]

Ainsi donc en juin 1999, une nouvelle coalition gouvernementale (libérale – socialiste – écologiste) voit le jour et nous retiendrons particulièrement de la déclaration du 7 juin 1999, l'extrait suivant :

> Un moratoire sera respecté sur la production d'énergie nucléaire (électrique) y compris le retraitement en MOX. Le gouvernement est prêt à s'engager dans la sortie progressive de l'énergie nucléaire à terme et ce, en respectant les objectifs fixés par la conférence de Rio et le protocole de Kyoto quant aux émissions de CO^2. Afin de laisser aux scientifiques le temps nécessaire à la mise au point de nouvelles sources massives d'énergies alternatives, renouvelables et propres, la Belgique s'inscrit dans un scénario au terme duquel la désactivation des centrales nucléaires sera entamée dès qu'elles auront atteint l'âge de 40 ans. Le gouvernement consultera l'Agence européenne pour l'environnement et interrogera une commission d'experts internationaux désignés par lui sur la faisabilité et la mise en œuvre de ce scénario.

Par la suite et dans la foulée, avant les élections communales du 8 octobre 2000, le gouvernement approuva en juillet 2000 (arrêté royal du 19 septembre 2000) le plan fédéral de développement durable 2000-2004, dans lequel nous retiendrons l'extrait suivant de la rubrique « politique de promotion d'un développement durable de l'énergie » point 396 :

> Le troisième objectif est la sortie du nucléaire. Il s'agit notamment de l'inscription de la Belgique dans un scénario au terme duquel la désactivation

[1] Voir aussi note de l'AFCN « L'AFCN et la sortie du nucléaire » du 06 septembre 2002.

des centrales nucléaires sera entamée dès qu'elles auront atteint l'âge de 40 ans et du moratoire sur le retraitement. Ce scénario étant fréquemment mis en cause dans le débat sur la relation entre la politique nucléaire et la politique climatique, le gouvernement s'engage à rédiger une note justifiant ce choix. Cette note sera rendue publique à la mi-2001. Toutes les informations disponibles, comme les résultats de la Commission AMPERE, forment un élément dans ce débat.

Afin de mettre en œuvre les décisions gouvernementales, l'arrêté royal instituant la commission AMPERE sera amendé à 3 reprises d'août 1999 à août 2000. Il s'agissait, en effet, de tenir compte du scénario de désactivation, de prévoir la relecture des conclusions de la Commission par une commission d'experts internationaux et de respecter les engagements pris en matière d'émission de CO_2. La commission remit son rapport en octobre 2000 et les experts internationaux en avril 2001.

D. Le volontarisme d'un parti et la loyauté fédérale

Par ailleurs, conforté par le succès des verts en Allemagne en juin 2000 (voir plus haut), le secrétaire d'État Deleuze, en charge du dossier, met enfin au point son plan d'action comme évoqué par Luc Barbé dans son ouvrage « *Ons actieplan* » :

1. Het principe van een wet inzake de kernuitstap binnenhalen bij het opstellen van de beleidsverklaring die de Premier zal voorlezen in de kamer bij de start van het parlementaire jaar (oktober 2001) – 2. Een advocatenbureau schrijft het wetsontwerp – 3. Een paar interkabinettenvergaderingen voor de kleine technische aspecten, en dan de forcing op « een kern » – 4. Debat in het parlement en goedkeuring van de wet. Stap voor stap werkten we dit af.

Et effectivement, dans sa déclaration de politique fédérale devant le parlement le 9 octobre 2001, le Premier ministre précise : « Conformément à l'accord de gouvernement, nous introduirons également dans les prochains mois un projet de loi relatif à la désactivation des centrales nucléaires âgées de plus de 40 ans ».

On notera ici que le Gouvernement avait finalement décidé de disposer de la désactivation des centrales nucléaires par la publication d'une loi contrairement à l'avis du secrétaire d'État à l'énergie qui préférait, au long processus législatif, un instrument plus souple et surtout plus rapide en l'occurrence : un arrêté royal pris en application de la loi du 29 avril 1999 relative à l'ouverture du marché de l'électricité. Cette décision fut, par ailleurs, confortée par l'avis de la CREG (Commission de régulation de l'électricité et du gaz), le 6 décembre 2001, sur l'avant-projet d'arrêté royal qui lui avait été soumis par le secrétaire d'État à l'énergie.

Et tout continue à s'enchaîner ! À la manœuvre, le Cabinet de l'énergie va de l'avant avec volontarisme et avec « forcing », en comptant sur la lo-

yauté fédérale. Plus rien ne l'arrête, même si la route reste truffée d'embûches. Les étapes se succèdent.

II. L'enfantement (de novembre 2001 à janvier 2003)

A. La mère et l'enfant

Le ton étant donné par la déclaration du 9 octobre 2001, la marche forcée pouvait commencer immédiatement. De la mi-octobre 2001 à la fin 2002, l'enfant (l'Avant-projet de loi) grandit dans le ventre de la mère arc-en-ciel. C'est pendant cette période cruciale que tout se décida et se dessina. Les étapes ci-après furent franchies :

- Le 21 novembre 2001, le Conseil des ministres approuve une note (avec Avant-projet de loi) du secrétaire d'État à l'énergie justifiant le bien-fondé de la décision de la désactivation par une certaine utilisation et interprétation des arguments et résultats de la Commission AMPERE.
- Dans une note immédiate et informelle – car non consulté officiellement – le co-président de la Commission AMPERE, Prof. J.-M. Streydio, réagit en estimant que le secrétaire d'État « fait une (re)-lecture fallacieuse du rapport et en manipule les conclusions ».
- Des négociations politiques capitales entre partenaires de la majorité se déroulent fin février 2002, tant au niveau du Conseil des ministres restreint (Kern) que des réunions inter-cabinets. Les textes de l'exposé des motifs et des différents articles de l'avant-projet de loi sont amendés suite à ces discussions. Parmi les diverses modifications de fond intervenues, notons plus particulièrement
  - La possibilité de revenir ultérieurement sur le processus de décision de désactivation, en cas de situations de menace pour la sécurité d'approvisionnement et de force majeure.
  - La prise en compte de la nécessité de maintenir des coûts de production concurrentiels.
  - La volonté de procéder dans le respect des obligations du protocole de Kyoto et de la compétitivité des entreprises.
  - L'utilité d'un plan indicatif annuel plutôt que triennal à partir de 2015.
  - L'évocation objective et détaillée du rapport AMPERE.
  - Le développement de nouvelles technologies dans le domaine de la production d'énergie nucléaire.
- Le 1er mars 2002, le Conseil des ministres approuve l'avant-projet de loi « sur la sortie progressive de l'énergie nucléaire à des fins de pro-

duction industrielle d'électricité » amendé. Le texte finalement adopté est l'objet d'un compromis minimaliste dans la mesure ou il introduit la possibilité de recours à la notion de force majeure. L'avant-projet est ensuite envoyé pour avis au Conseil d'État.

- Les remarques du Conseil d'État sont mineures et le Conseil des ministres approuve en deuxième lecture le projet de loi le 28 juin 2002.
- Le 08 juillet 2002, le projet de loi, assorti de l'avis du Conseil d'État, est déposé à la Chambre, l'urgence est demandée.
- La Commission pour l'économie de la Chambre, chargée d'examiner le projet de loi, décide cependant de prendre son temps et de procéder à des auditions. Elle se réunit 8 fois et procède à 2 séries d'auditions, les 24 et 25 septembre ainsi que le 23 octobre. Sont auditionnés :
  - Electrabel.
  - La Commission AMPERE.
  - La peer review de la Commission AMPERE.
  - Le Bureau Fédéral du Plan.
  - La Commission européenne (DG TREN et DG Environnement).
  - L'ONDRAF.
  - L'AFCN.
  - Les FGTB, CSC et CGSLB.

Les auditions, débats et réponses du secrétaire d'État à l'énergie ont encore été l'objet d'échanges argumentés mettant, à nouveau, en exergue :

- L'absence de mesures compensant la perte de production énergétique engendrée par la désactivation des centrales ;
- Une décision allant à l'encontre des recommandations de la commission AMPERE et de sa peer review ;
- Les 3 problématiques du nucléaire que sont les risques d'accident, les déchets radioactifs et le risque de prolifération, seules raisons avancées par le secrétaire d'État pour justifier sa politique.

Une dernière tentative d'amendement fut lancée : remplacer la notion de force majeure (qui suppose un évènement à caractère imprévu et imprévisible) par celle d'« état de nécessité » qui vise une notion de dilemme, à savoir « face à un risque, une obligation légale peut être écartée pour préserver un autre intérêt qui peut légitimement être privilégié compte tenu de sa grande importance sociale ». Dans le cas d'espèce, l'évocation aurait pu concerner la nécessité de disposer d'énergie électrique à des prix concurrentiels et le respect des engagements de Kyoto, mais rien n'y fit et le texte resta.

Le rapport de la Commission de la Chambre fut voté le 26 novembre 2002. (Voir doc. 50 1910/004 – Chambre des représentants – 26 novembre 2002 – Projet de loi pour la sortie progressive du nucléaire / rapport de la Commission de l'économie par Mme D. Douifi).

- Le 05 décembre 2002, le projet est voté à la Chambre.
- Le 16 janvier 2003, le projet est voté au Sénat.
- Le 31 janvier 2003, la Loi est promulguée.

B. La naissance et les réactions

Pour des raisons différentes – long terme pour les uns, court terme pour les autres – la naissance fut bien accueillie par tous les partenaires gouvernementaux. La cohésion gouvernementale ne s'était pas fissurée et l'échéance fixée dans la déclaration gouvernementale était respectée. L'avenir fera le reste.

Elle ne fut, par contre, pas bien accueillie par le monde des entreprises et les milieux académiques, sans même évoquer les producteurs d'électricité, propriétaires des centrales nucléaires. Nous citerons à cet égard, entre-autres, le séminaire – débat et les prises de position d'AGORIA (Fédération multisectorielle de l'industrie technologique) en mars 2002 et la lettre de janvier 2003 au Premier ministre Guy Verhofstadt du Professeur André Berger, Maître en sciences météorologiques du MIT, Docteur en sciences et professeur de climatologie à l'UCL « Sortir du nucléaire en ce début du 21e siècle est non seulement un anachronisme, mais est et restera la plus grande erreur jamais commise par un gouvernement en Belgique »

III. La vie

A. De l'arc-en-ciel à la violette et du temps au temps

En juin 2003, le nouveau gouvernement violette (coalition des libéraux et socialistes), toujours dirigé par le Premier ministre Guy Verhofstadt reprend à son compte – très logiquement – les engagements pris. Petit à petit, dès 2004, des évènements mondiaux et de nouvelles prises de position en faveur de l'énergie nucléaire font leur apparition. Citons, sans ordre :

- L'installation des mécanismes de libéralisation du marché de l'énergie et les concentrations industrielles qu'il génère et en particulier l'OPA de Suez sur Electrabel.
- L'émergence économique marquée de très grands pays (Chine, Inde, Brésil) et les conséquences à long terme sur la production et la demande d'énergie mondiale.

- Le renchérissement des prix pétroliers et gaziers qui résulte de l'accroissement de cette demande.
- L'évolution des changements climatiques et la prise de conscience croissante des décideurs et populations de leur importance à long terme et de la nécessité de réorganiser la production d'énergie en cessant d'exclure d'office l'intervention de l'énergie nucléaire.
- L'attention de plus en plus permanente portée à l'importance de la sécurité d'approvisionnement en énergie face aux instabilités régionales ou aux situations d'hégémonie et de monopole politique de certains pays ou zone de production pétrolière et gazière.
- La prise de position de la FEB en mai 2004 (FEB Stratégie 2010 – Pour un nouvel élan et un avenir pour nos enfants – D0140/2004/5), en faveur d'une énergie à des prix concurrentiels et s'exprimant comme suit : « l'énergie nucléaire a le coût de production comparatif le plus faible et elle ne produit aucun gaz à effet de serre. Ainsi, tant d'un point de vue économique que dans la perspective de la lutte contre les changements climatiques mondiaux, l'énergie nucléaire est une source d'énergie porteuse. Dès lors il est urgent de revoir la décision belge de « sortir du nucléaire ».

  Le temps fait son œuvre et de plus, la Loi donne du temps au temps.

B. La réévaluation gouvernementale et la Commission Énergie 2030 (CE 2030)

À peine installé, le nouveau ministre fédéral de l'Énergie, Marc Verwilghen s'exprime publiquement en septembre 2004 en faveur d'une nouvelle étude sur les besoins énergétiques de notre pays et sur la réévaluation dans ce cadre de la décision prise face au risque d'une perte d'indépendance énergétique et aux conséquences des changements climatiques.

Plusieurs autres responsables politiques de la majorité et de l'opposition s'expriment également dans ce sens.

Une nouvelle Commission d'études est constituée et commence informellement ses travaux en juin 2005 avant d'être installée officiellement le 6 décembre 2005 par arrêté royal (Moniteur du 19 décembre 2005 – Sevice public fédéral Économie, PME, arrêté royal du 6 décembre 2005 instituant une commission pour l'analyse de la politique énérgétique belge à l'horizon 2030) et invitée à remettre ses résultats et son rapport définitif en avril 2007, soit avant les prochaines élections fédérales.

L'article 2 précise « La Commission 2030 est chargée d'élaborer un rapport présentant les choix stratégiques de politique énergétique à moyen et long terme sur la base de scénarios définis par elle en concertation avec les services d'études du Bureau fédéral du plan et exécutés par lui ».

La Commission a remis son rapport préliminaire (disponible sur le site de la commission www.CE2030.be) au Premier ministre et au ministre Verwilghen, le 13 novembre 2006 et précise dans ses recommandations concrètes

> [...] According to the present analysis, the achievement of more stringent post-Kyoto policies in Belgium without nuclear power is expected to be extremely expensive. Therefore, Belgium has to keep the nuclear option open and it is advised to reconsider the nuclear phase out [...]

D'ici fin mars 2007, le rapport préliminaire aura été soumis aux différents « *peer reviews* » – à savoir le Conseil central de l'économie, le Conseil fédéral du développement durable, la BNB, l'Académie des sciences (BACAS), la Commission européenne, l'Agence internationale de l'énergie – et aux Régions avant d'être finalisé pour avril 2007.

Il sera alors présenté à la prochaine coalition gouvernementale qui aura donc ainsi en sa possession tous les éléments objectivés et discutés pour prendre une décision sereine sur la mise en application ou l'abrogation de la loi de sortie du nucléaire.

IV. La vie après la vie : les scénarios envisageables

À environ 8 ans de la première échéance de fermeture, différents scénarios sont encore possibles, à savoir :

- L'application de la Loi et la fermeture progressive de toutes les unités.
- L'application partielle de la Loi ou sa révision.

En fonction de l'article 9 de la Loi, la révision par des mesures d'autorisation de continuation de l'exploitation de certaines ou de toutes les unités est possible.

Une 4e révision décennale serait de toute façon organisée et révèlerait les adaptations et améliorations nécessaires à la poursuite de l'exploitation. La continuation pourrait se traduire par une ou deux périodes complémentaires de 10 ans d'activité conduisant à des durées de vie de 50 ou 60 ans. Aux USA, plusieurs dizaines de centrales ont reçu de l'autorité de sûreté des autorisations de prolongation.

Qu'il y ait arrêt progressif ou pas, l'État sera de toute façon amené assez rapidement en 2008/2009 à devoir se prononcer sur différentes options qui caractériseront le sort et le traitement des matières fissiles, des déchets et des mesures de sécurité à prendre en fonction de l'arrêt ou non de l'exploitation.

V. Qui vivra verra

Dès 2008, la nouvelle coalition gouvernementale sera amenée à prendre des décisions majeures que les exploitants ne manqueront pas de lui rappeler.

La Commission AMPERE

Ernest MUND

Professeur à l'ULB et à l'UCL

I. Mission et composition

La Commission AMPERE (pour 'Analyse des modes de production de l'électricité et le redéploiement des énergies') a été mise en place début 1999 par le ministre de l'Énergie de l'époque, Jean-Pol Poncelet. Sa mission, explicitée dans un arrêté royal du 19 avril 1999, était d'analyser les moyens de production d'électricité à l'horizon de 2020. La coalition gouvernementale ayant changé suite aux élections législatives du 13 juin 1999 et Olivier Deleuze ayant succédé à J.P Poncelet en tant que secrétaire d'État à l'énergie, la mission de la Commission fut élargie ultérieurement par un arrêté royal paru au Moniteur du 25 novembre 1999. Cet élargissement porta essentiellement sur l'examen de la sortie du nucléaire au-delà des 40 ans de durée de vie des centrales et sur la gestion de la demande d'électricité. Les termes de la mission sont inclus dans les articles 2 et 3 de la version coordonnée des deux arrêtés royaux dont le texte est reproduit ci-dessous :

> Art. 2. La Commission est chargée d'élaborer un rapport sur les choix futurs en matière de production d'électricité en attachant une attention particulière à la sortie progressive du nucléaire et au scénario dans lequel la désactivation des centrales nucléaires sera entamée dès qu'elles auront atteint l'âge de 40 ans, aux possibilités de maîtriser la demande d'électricité, et à la nécessité de développer des sources renouvelables d'énergie capables de produire un output important.
>
> Ce rapport, auquel est joint un document de synthèse, doit être adressé au Ministre ayant l'énergie dans ses attributions dans un délai de dix-huit mois à compter de la Constitution de la Commission.
>
> Le dépôt de ce rapport entraîne la dissolution de la Commission.
>
> Art. 3. Le rapport de la Commission comporte notamment l'examen des points suivants :

1° le contexte économique et énergétique général : description du cadre international et des tendances actuelles sur le marché des sources d'énergie primaire, évaluation du contexte et détermination des évolutions prévues pour la Belgique.

2° la demande d'électricité en Belgique : évaluation de la demande actuelle, évolution à moyen, et long terme en tenant compte notamment des meilleures pratiques internationales en matière de maîtrise de la demande (« *demand side management* »).

3° les technologies de production d'électricité : analyse des technologies utilisées actuellement dans le pays, examen des technologies alternatives ou en développement qui possèdent un potentiel en matière de production d'électricité et leurs implications sociales, économiques et environnementales, notamment en matière de gestion des déchets radioactifs (y compris l'évaluation des coûts des provisions pour la gestion des déchets radioactifs et le démantèlement des centrales nucléaires et des autres installations liées au cycle du combustible nucléaire) et d'émissions de gaz à effet de serre et d'autres polluants atmosphériques.

Sur la base de l'examen des points visés à l'alinéa 1er, le rapport de la Commission formule des recommandations et propositions visant à dégager, au départ de la situation actuelle en Belgique, des choix pour la production future d'électricité correspondant aux impératifs sociétaux et environnementaux du vingt et unième siècle, tenant compte des engagements internationaux de la Belgique dans le cadre de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, faite à Rio de Janeiro le 5 juin 1992 et approuvée par la loi du 11 mai 1995 et du Protocole de Kyoto, signé par la Belgique à New York le 29 avril 1998.

La Commission AMPERE fut composée de 16 membres, professeurs d'université et membres d'instituts de recherche choisis en fonction de leurs compétences dans les différents domaines de la production d'électricité (voir Tableau 1). La présidence de la Commission fut confiée à MM Jean-Pierre Pauwels (Directeur à la Banque nationale de Belgique) et Jean-Marie Streydio (Professeur de l'UCL), le secrétariat étant assuré par M. Laurent Jacquet de l'Administration de l'énergie.

II. Méthode de travail et recommandations de la Commission

Pour mener à bien la mission qui lui était impartie la Commission AMPERE constitua 9 groupes de travail (dénommés A, B, ..., I) en son sein, chargés d'examiner les points importants de la production d'électricité. Les travaux de chaque groupe furent coordonnés par un *correspondant*. L'analyse de la production d'électricité nucléaire et du cycle du combustible fut confiée au groupe E composé de MM D'haeseleer, Dick, Mathieu, Mund et Streydio, avec la participation de M. Jacquet, M. Mund

en étant le correspondant. Les travaux de ce groupe aboutirent à la rédaction d'un rapport principal et d'un rapport de synthèse dont la mise au point nécessita de nombreuses réunions de travail.

Les travaux de la Commission AMPERE firent l'objet d'une audition publique le 24 juin 2000 au cours de laquelle les correspondants présentèrent l'état d'avancement des réflexions de leurs groupes.

Sur la base des rapports de synthèse rédigés par les groupes spécialisés, des comptes rendus des réunions de ces groupes, et des points de vue exprimés lors de l'audition publique, les deux co-Présidents de la Commission rédigèrent les conclusions et les recommandations de la Commission ainsi qu'un résumé exécutif du rapport AMPERE. Les quatre parties du rapport (conclusions et recommandations, résumé exécutif, rapport de synthèse et rapport principal) reçurent l'approbation de tous les membres de la Commission. En ce qui concerne le volet « nucléaire » des travaux de la Commission, on trouvera le rapport de synthèse du Groupe E en annexe (voir Annexe 1).

Les recommandations effectuées par la Commission au sujet de la production d'électricité nucléaire et à l'abandon de cette filière par la Belgique se résument de la manière suivante :

- Pour assurer la sécurité opérationnelle du secteur électronucléaire, la sûreté de la population et la santé publique, *il convient de garantir le maintien d'un potentiel scientifique et technologique permettant aux producteurs d'électricité d'assurer que cette production se fasse de la manière la plus efficace et dans des conditions de sûreté optimale.*
- Le maintien d'un potentiel scientifique et technologique de haut niveau *implique la poursuite de la recherche et développement dans le domaine nucléaire ainsi que l'existence de programmes de formation susceptibles de maintenir le niveau de compétence nécessaire des agents du secteur électronucléaire* dans le secteur privé (production d'électricité nucléaire, amont du cycle du combustible et stockage des combustibles irradiés) et dans le secteur public (agence de gestion de l'aval du cycle du combustible et contrôle du secteur nucléaire).
- La Commission est d'avis *qu'il convient de maintenir l'option électronucléaire ouverte pour le futur* dans un contexte de renchérissement des hydrocarbures (dont le gaz naturel) et eu égard à l'absence d'émissions de gaz à effet de serre par l'exploitation du nucléaire. Maintenir l'option électronucléaire ouverte n'implique d'aucune manière une quelconque obligation de recourir à ces filières. Ce choix relève en démocratie du seul Parlement. Par ailleurs, les développements techniques futurs de l'électronucléaire devront être appréciés sur la base de leurs mérites propres dans divers domaines

comme : la sûreté de fonctionnement des installations, la limitation de l'aire de contamination en cas d'accident, la maîtrise de l'aval du cycle nucléaire (la gestion des déchets) ainsi que le niveau du coût de production.

- L'ensemble des efforts nécessaires pour garder ouverte l'option nucléaire ne doit pas se cantonner au contexte belge : *les initiatives nationales tireraient un grand profit de la coopération internationale (et en particulier européenne) mobilisant les expertises complémentaires acquises dans différents domaines comme le développement de filières électronucléaires nouvelles ou le stockage de déchets nucléaires.* Ce dernier point gagnerait sans doute beaucoup à être examiné au niveau européen, voire international.

III. Évaluation des travaux d'AMPERE

Les travaux de la Commission AMPERE firent l'objet de deux « peer review » rendues publiques. La première fut réalisée par le Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (GmbH) à la demande de Greenpeace Belgique, la deuxième par un comité d'experts étrangers à la demande du secrétaire d'État à l'énergie, M. Olivier Deleuze.

La critique de l'Institut de Wuppertal est très sévère, aucune recommandation d'AMPERE dans les différents domaines abordés ne trouvant grâce à ses yeux, pour des raisons de méthodologie mise en œuvre dans l'étude. Le reproche fait à la Commission AMPERE est de ne pas avoir développé un scénario intégré (*bottom-up*) d'analyse de la demande et de l'offre d'électricité, mais de s'être appuyée sur des prévisions agrégées de demande d'électricité, d'avoir analysé les potentiels et les coûts de systèmes de production et d'avoir comparé ceux-ci aux prévisions de la demande sans adoption préalable d'une politique rigoureuse en matière d'efficacité énergétique de la demande. Un autre reproche fait à la Commission est d'avoir négligé les effets d'intégration des systèmes de production d'électricité européens. D'après l'Institut de Wuppertal, la Commission a été ainsi incapable d'estimer les investissements et coûts nécessités par les systèmes de production d'électricité du futur. Les conclusions et recommandations de la Commission AMPERE en matière d'énergie nucléaire (maintien de l'option ouverte, etc.) sont purement et simplement ignorées, l'Institut de Wuppertal prenant acte de la décision politique de fermer les centrales belges existantes au-delà de 40 années de fonctionnement.

La critique du comité d'experts réuni à la demande du secrétaire d'État à l'énergie (composé de MM Ph. Bourdeau, B. Laponche, R. Morrison, J.B. Mortensen et Ph. Savelli) est plus nuancée et surtout plus constructive. Le comité reconnaît la valeur du travail accompli par la Commission

AMPERE tout en regrettant quelque peu le manque d'éléments nécessaires pour faciliter les prises de décision. Certes, il est reproché à la Commission de ne pas avoir décrit des scénarios détaillés d'offre et de demande d'électricité en plus des scénarios insérés dans le rapport de synthèse, mais le comité reconnaît leur existence (par exemple le scénario basé sur le modèle Markal utilisé par l'équipe de la KULeuven) et souligne leur intérêt.

Le comité avalise la plupart des avis de la Commission AMPERE, en particulier :

- l'introduction d'une politique active de gestion de la demande ;
- l'évaluation des technologies et de coûts de production qui leur sont liés ;
- l'évaluation du potentiel de production des énergies renouvelables en Belgique ;
- la recommandation vis-à-vis d'une gestion prudente de la production d'électricité décentralisée, compte tenu des problèmes potentiels que cela soulève dans un marché de l'électricité libéralisé ;
- la recommandations à propos de la nécessité du maintien du savoir-faire dans le domaine de l'énergie nucléaire (en particulier dans le domaine de la sûreté) et de la participation aux R&D sur les concepts de réacteurs du futur ;
- la recommandation à propos de la sécurité d'approvisionnement en matière de gaz naturel ;
- la recommandation de la promotion de R&D en matière de nouvelles technologies pour la production d'énergie.

En ce qui concerne plus particulièrement le volet nucléaire du rapport AMPERE les experts n'émettent aucune objection majeure à l'égard du fond (en particulier des conclusions relatives aux problèmes de sûreté et de gestion des déchets), sauf à introduire des remarques de détail. Par contre, la forme (de type encyclopédique) adoptée pour le rapport est jugée « de qualité » mais quelque peu dépassée et surtout, peu susceptible d'apporter une aide à la prise de décision.

IV. Bilan du rapport AMPERE

La Commission AMPERE fut invitée à présenter ses conclusions à la Commission Économie de la Chambre pendant une session de cinq heures suivie de questions et réponses ; de même au Sénat mais avec moins d'intérêt. De nombreuses conférences eurent lieu dans divers cercles industriels et scientifiques tels que le CEN, la SRBII, la SRBEE, mais aussi dans les groupes tels que Rotary, Kiwanis, etc. Un certain nombre d'articles de presse ont été publiés.

Peut-on établir un bilan des retombées du rapport AMPERE. Ce bilan est plutôt maigre. N'ayant pas plu aux autorités politiques auxquelles il était destiné, le rapport AMPERE est assez vite tombé dans l'oubli. On y a certes régulièrement fait référence, dans différents milieux et il a fait l'objet de nombreuses conférences mais reste totalement méconnu dans le public. Il constitue néanmoins un exercice original en Belgique dont on espère qu'il sera utile pour les réalisations futures du même type.

Tableau 1 : Composition de la Commission AMPERE

Noms	Titre	Université-Organisme	Pôle d'expertise
Coprésidents			
Jean-Pierre PAUWELS	Directeur, Professeur, Président	Banque nationale de Belgique Vrije universiteit Brussel (Prof. extraordinaire honoraire) Université libre de Bruxelles (Maître de conférence) Office national du Ducroire	Économie et géo-politique de l'énergie, Économie et finances internationales
Jean-Marie STREYDIO	Professeur Président	Université catholique de Louvain Organisme national des déchets radioactifs	Énergie nucléaire et solaire
Membres			
André BERGER	Professeur	Université catholique de Louvain	Climat
Francis BOSSIER	Chef de Projet	Bureau fédéral du Plan	Macroéconomie, demande d'énergie, modélisation
Michel CRAPPE	Professeur	Faculté polytechnique de Mons – Service d'électrotechnique	Réseaux, machines électriques, électronique de puissance
Jacques DE RUYCK	Professeur	Vrije universiteit Brussel – Département de mécanique	
William D'HAESELEER	Professeur	Katholieke Universiteit Leuven – Division mécanique appliquée et conversion d'énergie	Production classique et nucléaire, cogénération, émissions de CO_2
Eric DICK	Professeur	Département de mécanique des fluides – Universiteit Gent	Mécanique des fluides – turbines, éoliennes hydroélectricité
Didier GOETGHEBUER	Secrétaire général	Institut wallon de développement économique et social et d'aménagement du territoire	Demande d'électricité, gaz à effet de serre
Jan KRETSCHMAR	Directeur de recherche	Vlaamse instelling voor technologisch onderzoek	Énergies renouvelables, émissions, cycle de vie, URE
Bernard LEDUC	Professeur	Université libre de Bruxelles – Service de mécanique appliquée	Production classique
Philippe MATHIEU	Professeur	Université de Liège – Institut de mécanique	Production par combustibles fossiles et nucléaires, réduction du CO_2

Robert MERTENS	Professeur	Katholieke universiteit Leuven – IMEC	Énergies renouvelables, énergie solaire photovoltaïque
Johan NIJS	Professeur	Katholieke universiteit Leuven – IMEC	Énergies renouvelables, énergie solaire photovoltaïque
Ernest MUND	Directeur de recherche	Fonds national de la recherche scientifique – Université libre de Bruxelles	Énergie nucléaire
Steffan PROOST	Professeur	Katholieke universiteit Leuven – Faculté des sciences économiques et appliquées	Économie de l'environnement et de l'énergie
Mary SANCY	Professeur	Fondation universitaire Luxembourgeoise	Droit, Droit de l'environnement
Secrétariat			
Laurent JACQUET		Administration de l'énergie	Économie et techniques de l'énergie

Annexe 1. Commission AMPERE – Rapport de synthèse du Groupe E « Électricité nucléaire – Cycle amont et aval »

I. Introduction

Dès la fin de la deuxième guerre mondiale, la Belgique a opté pour la production d'électricité d'origine nucléaire[1]. Le pays dispose aujourd'hui d'un parc de 7 centrales à eau sous pression[2] représentant une puissance installée d'environ 5,8 GWe[3], à Doel dans le bassin du port d'Anvers (4 réacteurs) et à Tihange, sur les bords de la Meuse (3 réacteurs). Les centrales nucléaires belges fournissent environ 55 % de la consommation d'électricité du pays[4]. Les réacteurs les plus anciens ont un peu moins de 25 ans, les plus récents en ont 15. Fin 1999, leur durée de fonctionnement cumulée est de 163,5 réacteur-an. La production totale d'énergie électrique des centrales nucléaires belges s'élève depuis le début jusqu'à fin 1999, à environ 700 TWh[5], correspondant à une production annuelle comprise entre 45 et 50 TWh. Une analyse des indicateurs de performance (comme, par exemple, le facteur de capacité) montre que les centrales belges se situent aux premiers rangs dans le monde[6]. En d'autres termes,

---

1 Ce texte est la synthèse des 9 chapitres consacrés aux différents aspects (sûreté, déchets, prolifération…) de la production d'électricité par voie nucléaire. Pour plus de détails, nous renvoyons le lecteur au texte de base, en indiquant dans chacun des cas, le (ou les) chapitre(s) concerné(s).

2 Désignées par les sigles « REP » en français et « PWR » en anglais. Nous utiliserons le sigle anglais plus répandu dans la littérature et mieux connu du public.

3 Le GWe (gigawatt électrique) vaut 1 000 mégawatt électriques.

4 En mai 2000, 436 centrales nucléaires sont en état de fonctionnement dans le monde, représentant une puissance installée de 351,7 GWe (environ 18 % de la production mondiale d'électricité). La répartition selon les types de réacteurs est la suivante : PWR (58 %), BWR (21 %), réacteurs refroidis au gaz (8 %), CANDU (9 %), autres (4 %). À ce jFour, la durée totale de fonctionnement des réacteurs dans le monde est de 9,414 réacteur-an. La plupart des unités en fonctionnement appartiennent à la 2ème génération (voir § 8). Par ailleurs, 38 réacteurs sont en cours de construction dans divers pays : Argentine (1), Brésil (1), Chine (7), Corée (4), Japon (4), Russie (4), Ukraine (4), etc.

5 Le terawattheure vaut un million de megawattheure (1 TWh = 1 000 000 MWh).

6 Le facteur de capacité (ou taux d'utilisation) des centrales nucléaires belges en 1999 a atteint la valeur de 97,3 %, la plus élevée au monde (Corée (88,2 %), France (79,3 %),

il est légitime de parler aujourd'hui de maturité industrielle à propos de la production d'électricité par voie nucléaire en Belgique. Ce qui n'exclut pas, bien entendu, quelques incertitudes[7] et des interrogations pour l'avenir.

À l'époque où les premières centrales nucléaires furent construites, une préoccupation majeure était la sûreté d'approvisionnement en combustibles fossiles. La crise pétrolière des années 1970 et les problèmes politiques au Moyen-Orient semblaient justifier le choix d'une certaine « indépendance énergétique » et la recherche d'une plus grande stabilité du prix du kWh, avantages notoires de la filière nucléaire. En effet, les sources d'approvisionnement en uranium dans le monde sont différentes des sources de combustibles fossiles. Les caractéristiques du combustible nucléaire rendent les problèmes de pénurie (en cas de crise politique majeure) beaucoup moins aigus et l'incidence du combustible sur le prix du kWh est nettement plus faible dans le cas « nucléaire » que dans le cas « fossile ».

Aujourd'hui, à la fin de la guerre froide, cet argument en faveur du nucléaire n'est pratiquement plus évoqué, bien qu'il garde toute sa pertinence comme le montre la volatilité actuelle du prix des carburants. Par ailleurs, plusieurs problèmes géopolitiques subsistent, qui pourraient avoir un impact sérieux sur notre approvisionnement en énergie primaire. Par contre d'autres éléments interviennent en sens contraire qui ont également une connotation économique : la libéralisation du marché de l'électricité jointe aux réticences du public, rend les moyens de production requérant de gros investissements au départ (hydraulique, nucléaire) peu attractifs[8] par rapport à d'autres modes de production d'énergie électrique, comme par exemple le gaz naturel. Enfin, trois préoccupations agitent l'opinion publique : (1) la méfiance grandissante vis-à-vis des risques d'accidents de réacteurs – les accidents de Three Mile Island et de Tchernobyl ont, à cet égard, eu un effet psychologique majeur – ; (2) la question des déchets nucléaires inquiète une partie de la population qui perçoit le problème comme une menace à l'égard du maintien de la qualité de l'environnement à transmettre aux générations futures ; (3) les problèmes de prolifération (armes nucléaires, terrorisme, chantage) qui évoquent invariablement le spectre de la guerre nucléaire.

Les éléments évoqués ci-dessus ont renforcé le côté « inacceptable » du nucléaire dans sa perception par l'opinion publique. Les conséquences

---

Japon (80,4 %), RFA (90,25 %), Suède (79,8 %), USA (86,8 %). Source de renseignement NEA-OCDE).

7 Par exemple, en ce qui concerne l'élimination des déchets de haute activité (voir plus loin au § 6).

8 Pour de nouvelles centrales.

qui en résultent quant à son maintien dans la production d'énergie électrique à moyen terme sont difficiles à prédire, bien que, par ailleurs son utilisation offre aussi des avantages non négligeables dans une perspective de « développement durable ». On en dénombre au moins cinq : (1) La préservation de ressources naturelles qui n'existent qu'en quantités limitées. Contrairement aux ressources fossiles dont les utilisations sous forme de biens durables sont nombreuses (polymères, fibres de carbone, etc.), on ne peut rien faire d'autre avec l'uranium, si ce n'est produire de l'énergie. Dans une politique de développement durable il serait donc préférable d'utiliser les combustibles fossiles à des fins plus nobles (carbochimie, pétrochimie). (2) Pour une même quantité d'énergie électrique produite, on dépense beaucoup moins d'uranium que de combustible fossile. À titre d'exemple, les 700 TWh d'énergie électrique produite par les centrales nucléaires belges ont nécessité environ 2 400 t d'UO_2 enrichi en ^{235}U alors que, pour produire la même quantité d'électricité, par exemple à partir de charbon, il aurait fallu en brûler environ 200 millions de t. Il en résulte que le nucléaire produit une quantité limitée de déchets par kWh, en comparaison des déchets associés à l'utilisation des combustibles classiques. Comme la question des déchets nucléaires est particulièrement délicate, il en sera question plus loin au § 6. (3) L'énergie est abondante. Grâce aux réacteurs surgénérateurs ou aux systèmes couplés accélérateur-source de fission, on peut fabriquer plus de combustible qu'on en consomme : du ^{239}Pu par capture de neutrons dans l'^{238}U, ou de l'^{233}U par capture de neutrons dans le ^{232}Th[9]. (4) L'énergie nucléaire n'entraîne pas une immobilisation extensive du sol, comme le ferait par exemple une utilisation à grande échelle d'énergies renouvelables comme la biomasse ou l'énergie éolienne. Enfin et surtout (5) l'énergie nucléaire n'a pas (ou peu) d'incidence sur le climat. Il n'y a pas d'émissions de gaz à effet de serre, sauf si on comptabilise l'énergie primaire (classique) ayant servi à produire les matériaux de construction des centrales nucléaires et à enrichir l'uranium consommé dans les centrales[10].

Comme la question des risques est au cœur du débat, nous résumons ci-dessous les points essentiels liés aux effets des rayonnements ionisants (et à la radioprotection), aux risques d'accidents de réacteurs, à l'utilisation du combustible MOX[11], à la durée de vie des centrales nucléaires et à la question des déchets telle qu'elle se présente en Belgique. Nous examinons ensuite le problème de la prolifération nucléaire tel qu'il se pose

---

9 Le ^{232}Th est un isotope fertile, comme l'^{238}U. L'^{233}U et le ^{239}Pu sont tous deux fissiles aux basses énergies.

10 On compte moins de 10 g/kWh d'équivalent CO_2 pour le nucléaire et 400 g/kWh d'équivalent CO_2 pour l'utilisation du gaz naturel dans des centrales à cycle combiné (voir le texte relatif au climat).

11 Pour « *Mixed Oxide Fuel* », combustible mixte UO_2/PuO_2.

en Belgique, nous introduisons les projets de réacteurs du futur, nous évoquons la possibilité de recourir (à long terme) à l'utilisation de la fusion thermonucléaire contrôlée, avant de conclure.

II. Les rayonnements ionisants et leurs effets

Le passage d'un rayonnement (photons, particules chargées, neutrons) dans la matière s'accompagne d'un dépôt local d'énergie[12]. Si la matière est un tissu vivant, il peut en résulter des dommages, en particulier pour les noyaux des cellules (ADN) constitutives du tissu vivant. Les conséquences de l'irradiation dépendent essentiellement de la quantité d'énergie déposée dans le tissu et de la nature du rayonnement mis en jeu. Pour évaluer ces conséquences, on dispose de la notion de « dose équivalente » dont l'unité est le sievert (Sv) et dont la valeur, lors d'une exposition, détermine les conséquences de celle-ci, indépendamment de la nature du rayonnement.

Une propriété essentielle du rayonnement radioactif, très favorable du point de vue de la sûreté, est le fait que tout en n'étant pas accessible aux sens (vue, odorat, toucher, etc.), celui-ci est facilement détecté par des moyens physiques et peut être mesuré avec une grande précision à l'aide d'un appareillage simple, quelle que soit la plage d'intensité. Il en résulte que si une présence anormale d'un rayonnement est détectée dans l'environnement, on peut toujours décider des moyens appropriés pour remédier à cette situation. Il n'en va pas nécessairement de même dans le cas où on a affaire à des substances chimiques toxiques à faibles concentrations (en cas de pollution), plus difficiles à mesurer et dont les risques sont difficiles à quantifier.

De tout temps, l'humanité a été confrontée au problème du rayonnement. Il existe en effet un fond naturel de rayonnement auquel il est impossible d'échapper et qui peut servir d'élément de référence pour juger de l'impact des activités humaines mettant en jeu une exposition au rayonnement. Ce fond naturel englobe principalement le rayonnement cosmique, le rayonnement dû à l'uranium et au thorium largement répartis dans la couche terrestre[13], le radon (un gaz, sous-produit de la désintégration de l'uranium) qui se dégage de certains terrains ou de roches et que l'on retrouve dans l'habitat et enfin, le ^{40}K mélangé en proportion faible au potassium naturel qui rend sols, plantes, animaux et êtres humains naturellement radioactifs. L'ensemble des éléments mentionnés ci-

---

[12] La notion de « risque » et les effets dus aux rayonnements ionisants sont analysés dans le chapitre 6. Voir également le chapitre 4 (Sûreté des centrales nucléaires) pour les aspects légaux en Belgique.

[13] Dans nos contrées, un jardin de 20m × 20m contient environ 6 kilos d'uranium (naturel) dans la couche supérieure, sur une profondeur de 10 à 15m.

dessus constitue la radioactivité naturelle en Belgique qui représente pour chaque habitant une dose annuelle moyenne[14] (en espace) d'environ 2,6 mSv (millisievert). On notera que cette valeur est relativement faible, en comparaison à d'autres régions du monde[15].

La dose annuelle de rayonnement due aux activités humaines est beaucoup plus faible. Elle est estimée à 1 mSv. Elle provient à 95 % des applications médicales[16], les autres sources d'exposition étant (par ordre d'importance décroissante) : les conséquences des essais nucléaires dans l'atmosphère, l'accident de Tchernobyl, les écrans de télévision, différentes applications industrielles et l'énergie nucléaire. La contribution moyenne de cette dernière à la dose reçue par la population est d'environ 0,001 mSv/an. Cette valeur extrêmement faible (1/2 500 de la dose de rayonnement naturel) est le résultat d'une application très stricte des règlements et procédures en matière de radioprotection dans l'exploitation quotidienne des centrales, y compris les opérations de rechargement du combustible et de maintenance des équipements.

En ce qui concerne la philosophie de la radioprotection, celle-ci est construite à partir de l'hypothèse « linéaire sans seuil » (LSS) selon laquelle toute dose de rayonnement, si petite qu'elle soit, peut provoquer un dommage (cancer, mutation génétique). En partant d'une valeur de la probabilité d'un effet nocif par unité de dose P, la relation linéaire sans seuil permet de calculer aisément une estimation des conséquences (par exemple, l'incidence du rayonnement naturel sur les cancers) en multipliant la dose cumulée (c'est-à-dire intégrée à toute la population concernée) par la probabilité P d'être atteint d'un cancer, par unité de dose. Des études épidémiologiques faites sur des sujets ayant subi des doses de rayonnement élevées ont conduit (CIPR26) à adopter une valeur de $P=10^{-2}$ par Sv pour une irradiation au corps entier (et également des valeurs particulières pour des irradiations localisées d'organes du corps humain). En d'autres termes, de la relation LSS on déduit que, parmi 100 000 per-

---

[14] Les valeurs locales, comprises entre 1,6 mSv/an (Bruges) et 3,9 mSv/an (Beaumont) proviennent de la géologie, les terrains schisteux du sud du pays étant plus riches en ^{40}K, en uranium et en thorium.

[15] Ainsi par exemple, du fait de la géologie du terrain on a (en valeurs moyennes) pour les granits de Bretagne, 5,2 mSv/an, les granits de Finlande, 7,4 mSv/an, les plages de Rio de Janeiro, 6 mSv/an, les sables monazites de l'état de Kerala (Indes) 15 mSv/an et les granits de Ceylan, 30 mSv/an. Les valeurs locales sont parfois plus élevées. On notera aussi que 5 vols transatlantiques (aller et retour) à 10 000 m d'altitude représentent une dose équivalente additionnelle de 0,5 mSv due au rayonnement cosmique.

[16] Dont les effets bénéfiques (radio-diagnostic, radio-thérapie, imagerie médicale, etc.) sont infiniment plus importants que les effets néfastes des doses associées. Il convient de souligner aussi qu'un effort considérable est fait aujourd'hui pour minimiser ces doses dans le secteur médical, tout en gardant l'efficacité de l'utilisation des rayonnements ionisants.

sonnes ayant subi une irradiation d'un mSv, en moyenne une d'entre elles mourra d'un cancer suite à cette irradiation.

La règle LSS date des années 1950, époque à laquelle les conséquences des irradiations aux faibles doses étaient mal connues. Elle a toujours été défendue par la CIPR[17] qui a régulièrement abaissé les limites de dose pour les personnes professionnellement exposées et pour le public. Elle rencontre aujourd'hui une opposition croissante dans le monde scientifique, certains chercheurs étant convaincus, sur la base d'études épidémiologiques les plus récentes, qu'aux très faibles doses il existe un seuil en dessous duquel il n'y a pas de dommage. Actuellement, même au sein de la CIPR des experts pensent qu'une dose intégrée calculée à partir d'une très faible dose appliquée à un très grand nombre de personnes n'a pas de sens et ne devrait plus être utilisée.

La législation belge en matière de radioprotection remonte à l'arrêté royal du 28 février 1963, modifié à de nombreuses reprises pour adapter les règlements aux recommandations d'institutions scientifiques internationales. Les limites de dose (annuelle) réglementaires étaient de 50 mSv/an pour les travailleurs professionnellement exposés et de 5 mSv/an pour le public. Elles ont été abaissées à 20 mSv/an et 1 mSv/an respectivement lors de la transposition dans la législation belge (mai 2000) de la Directive européenne 96/29 qui se base sur le rapport 60 de la CIPR (1990). Compte tenu des chiffres donnés plus haut, relatifs à la contribution des installations nucléaires sur la dose de rayonnement au public (par ailleurs, très en dessous des valeurs réglementaires), on ne peut que conclure à un impact quasi nul de l'exploitation des centrales nucléaires et des industries liées au cycle du combustible sur la santé publique, à l'échelle du pays.

III. La sûreté des centrales nucléaires

La Belgique a choisi la filière des réacteurs PWR, la plus répandue dans le monde, avec circuits de refroidissement primaire et secondaire et combustible UO_2 (faiblement) enrichi en ^{235}U[18]. La physique des réacteurs PWR (neutronique, thermohydraulique) a fait l'objet d'études approfondies durant les décennies écoulées, pour l'analyse des situations accidentelles en ce qui concerne le cœur du réacteur (les accidents de criticité), des circuits de refroidissement (les accidents de perte de réfrigérant), de perturbations diverses dans le fonctionnement de la centrale ou de la conduite des installations (les accidents dus aux erreurs humaines).

---

17 Pour « Commission internationale de protection contre les radiations ».

18 La sûreté des centrales nucléaires (du point de vue des risques d'accident) et les aspects légaux associés font l'objet du chapitre 4. C'est dans ce chapitre également que l'on traite du contrôle des installations et de la sûreté nucléaire en Belgique. En ce qui concerne les centrales PWR, on consultera également les chapitres 1 et 2.

Des installations expérimentales ont été construites, dans lesquelles des accidents ont été simulés pour mieux en comprendre les différentes séquences (les expériences LOFT[19] aux USA ou Bethsy en France). Des développements importants ont été réalisés dans le domaine des méthodes de calcul pour prédire les probabilités d'accident (analyse probabiliste du risque). Cet effort est toujours poursuivi en vertu du principe que, même si le risque zéro n'existe pas, il est toujours possible d'abaisser un risque résiduel en améliorant les maillons faibles de l'installation telle qu'elle est conçue à un moment donné.

L'importance de la sûreté dans la conception et le développement de la filière des réacteurs à eau est unique dans l'histoire de la technique. Cette importance est illustrée par le développement d'une philosophie de la sûreté basée sur le concept de « défense en profondeur ». Selon la philosophie de sûreté, l'accident est supposé pouvoir se produire mais l'existence de systèmes de sauvegarde autour du réacteur permet de minimiser les conséquences de l'accident sur les personnels de la centrale, sur le public et sur l'environnement. L'absence de conséquences graves suite à l'accident de Three Mile Island (hormis la destruction complète du cœur du réacteur TMI-2[20]) est une illustration de l'importance et de l'efficacité de cette philosophie. L'importance d'une philosophie de sûreté est encore soulignée à rebours par l'exemple de l'accident de Tchernobyl où l'absence quasi totale de règles de sûreté a eu des conséquences considérables pour l'environnement.

Les accidents de TMI-2 (1979) et Tchernobyl-4 (1986) sont dans toutes les mémoires. De ces deux événements, seul le premier revêt une importance pratique pour la Belgique, à cause de la similitude des centrales. Les caractéristiques physiques de la filière russe RBMK étant fondamentalement différentes de celles des centrales belges, l'accident de type Tchernobyl doit être exclu en Belgique[21].

La philosophie de sûreté évoquée ci-dessus s'applique en Belgique, notre pays ayant décidé de partir des règles américaines pour la construction de ses centrales nucléaires. Dès le stade de leur conception, les centrales belges se caractérisaient par une défense en profondeur plus importante que celle qui a été prise en compte dans les règles américaines, en

---

19 Pour « Loss of Fluid Test ».

20 Le site n'a pas été affecté, le cœur fondu est resté dans la cuve, seuls les gaz rares et l'iode ont été relâchés.

21 L'impact radiologique de l'accident de Tchernobyl en Belgique fut très faible, la dose naturelle (2,6mSv/an) ayant subi une augmentation de 1,5 % (due au césium-137 dégagé dans l'accident). À titre de comparaison, on notera qu'en ce qui concerne le césium-137 (dont la demi-vie est de 30 ans) les conséquences radiologiques en Belgique des essais nucléaires (américains et soviétiques) dans l'atmosphère dans les années 1960, furent 2,5 fois plus importantes.

particulier en ce qui concerne l'enceinte de confinement, ultime protection avant rejet (éventuel) de radioactivité dans l'environnement : (1) double enceinte de confinement renforcée (c'est-à-dire « bunkérisée »), pour parer aux accidents d'origine externe, (2) collecte des fuites éventuelles dans l'espace situé entre les deux enceintes et filtration avant rejet à l'atmosphère, mais aussi : (3) boucles de refroidissement du circuit primaire équipées de trois trains de sûreté indépendants au lieu des deux trains habituels, (4) programmes de qualification pour tout ce qui concerne les structures, systèmes et composants en fonctionnement normal et en cas d'accidents, etc.

Les centrales belges ont bénéficié de tous les enseignements fournis par l'analyse de l'accident de TMI-2 et ont été adaptées en conséquence tant au niveau des équipements que des procédures et de la gestion d'un accident si tant est que celui-ci devait survenir. À titre d'exemple, signalons que les centrales belges ont été équipées de systèmes passifs autocatalytiques de recombinaison d'hydrogène, de manière à éviter une explosion susceptible d'endommager l'enceinte, en cas d'accident par perte de réfrigérant (LOCA[22]), suivi de fusion du cœur.

Un accident de référence comme le LOCA est possible dans une centrale belge, mais sa probabilité est extrêmement faible[23]. S'il devait arriver malgré tout, les conséquences de l'accident seraient inférieures à celles de TMI-2 compte tenu du niveau de sûreté atteint aujourd'hui dans les centrales. Or, pour l'accident de TMI-2 on estime aujourd'hui que l'impact radiologique de l'événement sur la population environnante fut (au moment de l'accident) d'environ 0,01 mSv (c'est-à-dire environ 1/20 de la dose annuelle due au rayonnement naturel). Il convient de préciser que la sûreté des centrales nucléaires belges fait l'objet d'une surveillance étroite par l'organisme de contrôle AVN, placé sous l'égide de l'Agence fédérale de contrôle nucléaire.

IV. Retraitement et utilisation du MOX

Les réacteurs à eau légère produisent du plutonium[24]. Environ 1 % de la masse du combustible nucléaire déchargé d'un réacteur PWR est un mélange de différents isotopes du plutonium (appelé plutonium de 1e génération). Peu avant le déchargement du combustible, ce plutonium

---

22 Pour « Loss of Coolant Accident ».

23 Tous les calculs effectués récemment pour différentes centrales PWR donnent une fréquence de fusion du cœur consécutive aux différents accidents de l'ordre de 0,00005 par an (5.10^{-5} /réacteur-an), c'est-à-dire en moyenne une fusion tous les 20 000 ans.

24 Le retraitement du combustible usé et l'utilisation du MOX sont abordés dans le chapitre 3 consacré au cycle du combustible nucléaire.

fournit environ 40 % de l'énergie dégagée, le solde (60 %) provenant de la fission de l'^{235}U.

Le retraitement du combustible irradié avec séparation en trois composantes (uranium, plutonium et produits de fission) a essentiellement deux finalités importantes : (1) récupérer la matière fissile contenue dans le combustible usé et (2) faciliter l'élimination des déchets à long terme, par réduction des volumes qui doivent être isolés de l'environnement. Dans le cas où on applique le retraitement, seuls les produits de fission et des actinides[25] mineurs sont considérés comme un déchet. Les volumes à « éliminer » sont donc nettement plus faibles que si la totalité des assemblages de combustibles usés était considérée comme un déchet[26]. La récupération du plutonium en tant que matière fissile était envisagée dans le passé, dans le but d'assurer un déploiement de la filière des réacteurs à neutrons rapides. La mise en place de cette filière ayant été postposée *sine die*[27] (sauf peut-être au Japon), le stock de plutonium (de 1e génération) est en augmentation constante. La seule réduction possible du stock de plutonium de 1e génération dans cette optique est celle qui consiste à utiliser ce plutonium comme combustible dans les réacteurs à eau, sous une forme appropriée (le MOX) obtenue en mélangeant de l'oxyde de plutonium de 1e génération à de l'oxyde d'uranium à teneur réduite en ^{235}U.

Il convient de remarquer que, la filière PWR n'ayant pas été conçue au départ pour l'utilisation d'un combustible à teneur élevée en plutonium, des incertitudes de nature physique pourraient se présenter (coefficients de réactivité, fraction des neutrons retardés, etc.) si la majorité des assemblages combustibles étaient du MOX[28]. La Belgique a été pionnière en matière d'études et d'utilisation du MOX, les premières réalisations remontant aux années 1960, dans le réacteur BR3 au SCK • CEN à Mol[29]. Tous les aspects de « physique du cœur » liés à l'utilisation du combustible MOX dans les PWR du point de vue de la sûreté (et ceci jusqu'à des taux d'épuisement élevés), font l'objet de travaux importants à Mol où ils

---

[25] Du nom de l'élément *actinium*. On donne le nom d'*actinide* à tous les nuclides dont le nombre atomique Z est supérieur ou égal à 89. Les actinides mineurs évoqués ici sont des transuraniens qui apparaissent au cours de l'utilisation du combustible nucléaire par réactions de capture (n,γ) dans les noyaux lourds.

[26] Voir également la remarque en début du § 6.

[27] La crainte de manquer d'uranium s'étant estompée et le coût de construction d'un réacteur rapide étant supérieur à celui d'un PWR.

[28] L'augmentation de la teneur en plutonium offre quelques désavantages comme par exemple une fraction réduite de neutrons retardés. Par ailleurs, la stabilité du combustible est accrue par rapport au combustible classique UO_2 (ce qui est un avantage) et le comportement du combustible MOX est meilleur lors de rampes de puissance.

[29] Il convient de noter cependant qu'en matière d'utilisation courante du MOX dans les centrales de puissance, la Belgique a été devancée par plusieurs pays parmi lesquels la France, l'Allemagne et la Suisse.

ont été très sérieusement étudiés depuis de nombreuses années. Il s'agit notamment de la calibration des codes de calcul, à partir d'expériences faites dans la maquette critique VENUS. Le Centre nucléaire de Mol et Belgonucleaire sont reconnus comme des leaders mondiaux en matière de connaissance du MOX, les études faites dans VENUS faisant l'objet de contrats de recherche avec les principaux fabricants de combustible nucléaire dans le monde.

Le combustible MOX introduit dans les centrales Doel-3 et Tihange-2[30], obtenu à partir du procédé MIMAS développé par Belgonucleaire, a des caractéristiques physiques très proches du combustible UO_2 standard. Selon la réglementation belge en vigueur, l'introduction du MOX dans les réacteurs belges a fait l'objet d'une étude approfondie de sûreté préalable couvrant tous les aspects de la question[31]. Cette étude, examinée en Commission Spéciale en 1993, a été suivie de l'octroi d'une autorisation d'exploitation pour la quantité de plutonium issue du retraitement, ce qui devrait couvrir environ 10 ans d'exploitation de deux réacteurs. Au cours de cette période un maximum de 37 assemblages MOX seront présents dans chaque réacteur[32]. Le niveau de sûreté des centrales nucléaires n'est en rien affecté par rapport à sa valeur habituelle, suite à cette opération.

Le 4 décembre 1998, soit 5 ans plus tard, considérant que l'état d'avancement des travaux ne permettait pas de rassembler les éléments nécessaires à une évaluation globale entre le retraitement et le conditionnement et l'évacuation directe du combustible usé, le Gouvernement belge a demandé aux administrations et aux organismes concernés de poursuivre leurs recherches.

Il a également décidé que, durant la période consacrée à la poursuite de ces recherches, aucune nouvelle initiative ne serait engagée en la matière. Il a approuvé la résiliation du contrat de retraitement de 225 t conclu entre Cogema et Synatom en 1991 et a demandé à cette dernière de ne conclure aucun nouveau contrat de retraitement sans son accord formel.

V. La durée de vie des centrales nucléaires

Une installation nucléaire n'a pas de durée de vie fixée *a priori*[33]. Sur le plan technique toute composante de l'installation est remplaçable. La seule contrainte imposée est la garantie que la sûreté du système soit au moins aussi élevée que celle du système d'origine. Cette philosophie n'est

---

30 Mélange UO_2/PuO_2 à 7,7 % en plutonium et 0,225 % en ^{235}U.

31 Conception et comportement physique et thermodynamique de l'assemblage, études d'accidents, conséquences radiologiques, etc.

32 Les cœurs de Doel-3 et Tihange-2 comportent chacun un total de 157 assemblages.

33 La question de la durée de vie des centrales nucléaires fait l'objet du chapitre 7.

d'ailleurs pas propre aux centrales nucléaires comme le prouvent la révision générale des avions de ligne environ tous les huit ans (avec remplacement de composantes importantes) ainsi que les remplacements importants de composantes de voitures de course dans la catégorie « tourisme ».

À un certain moment le coût de la maintenance ou du remplacement des composants usagés peut s'avérer trop élevé et la question devient alors un problème d'ordre économique. Si un nouvel investissement s'avère non rentable, on prendra alors la décision de fermer l'installation et, éventuellement d'en construire une autre entièrement neuve.

Dans les centrales nucléaires on pratique tous les dix ans une révision fondamentale de l'installation selon les critères techniques en vigueur. Un grand nombre de modifications peuvent avoir lieu, qui assurent à l'installation une nouvelle vie pour une période de dix ans. Comme exemple de modification importante effectuée avec succès, il convient de citer les remplacements (devenus quasi routiniers) des générateurs de vapeur.

Deux aspects permettent éventuellement de déterminer la durée de vie des centrales. La fragilisation de la cuve du réacteur constitue le problème le plus délicat, mais pas nécessairement insurmontable. Si la fragilisation est trop avancée, on peut réaliser un « recuit » de la cuve. Le remplacement de la cuve n'est pas davantage exclu. Dans un tel cas il est cependant possible que pour des raisons économiques, cela ne soit plus une option réaliste. Pour suivre attentivement le degré de fragilisation de la cuve, on place des éprouvettes à proximité du cœur du réacteur. En ce qui concerne le degré de fragilisation, celui des éprouvettes est d'un facteur 2 à 3 plus élevé que celui de la cuve. On connaît donc suffisamment longtemps à l'avance le moment où la cuve du réacteur pourrait poser problème.

Un deuxième aspect est la fatigue du métal constitutif du circuit primaire. La fatigue est déterminée par le nombre et l'importance des transitoires d'arrêt d'urgence, de réchauffements, de refroidissements, etc. Dans la phase de conception, le circuit primaire est dimensionné pour faire face à un certain nombre de transitoires de ces types. On part de l'estimation qu'un nombre X de transitoires par an doit être prévu durant Y années. Dans certains cas, une durée de 30 ans fut adoptée comme valeur repère. C'est la raison pour laquelle ce chiffre est souvent cité, à tort, comme étant la durée de vie de conception des centrales. Après 20 ans d'exploitation des centrales, on a pu vérifier le nombre de transitoires réellement subis par les installations et on a constaté que ce nombre est beaucoup plus petit que les valeurs enveloppes considérées lors de la conception. De plus, la nature des transitoires peut être fortement influencée par le soin avec lequel l'exploitation des centrales est menée. On peut donc espérer que le circuit primaire aura une durée de vie plus longue que celle anticipée par une simple règle de trois. Si toutefois des problèmes de fatigue du circuit primaire devaient surgir, il est encore possible de pré-

voir des remplacements de pièces bien précises (par exemple, aux endroits courbés, etc.). Ici aussi, le coût de l'opération est un élément déterminant. S'il est trop élevé, on peut décider la fermeture de la centrale.

Pour terminer, il importe encore de préciser que les méthodes de calcul en mécanique du solide, en particulier dans le domaine de la mécanique de la rupture, ont fait de tels progrès suite à la révolution informatique et numérique (analyse en éléments finis) qu'on est mieux armé aujourd'hui pour prédire le comportement détaillé de l'installation sans devoir recourir à des hypothèses simplificatrices pénalisantes. Si, à l'heure actuelle, on se trouve capable de prévoir une plus longue durée de vie des composants, c'est aux techniques modernes d'analyse qu'on le doit.

En conclusion, il n'y a pas de raison scientifique ou technique qui justifie la mise à l'arrêt anticipée d'une centrale nucléaire. Seules des raisons économiques peuvent imposer cette opération. Une décision politique qui déterminerait une durée de vie *a priori* d'une centrale nucléaire ne peut être fondée sur des arguments scientifiques. Toutefois, l'autorité démocratiquement élue peut toujours – à l'intérieur des règlements en vigueur qu'elle ne change pas elle-même – prendre des mesures pour les raisons qu'elle estime valables.

VI. Les déchets nucléaires

Indépendamment de la question des déchets nucléaires telle qu'elle se pose en Belgique[34], il convient de rectifier en premier lieu deux erreurs largement répandues dans l'opinion publique : (1) La durée de vie des déchets n'est en aucune manière une mesure du risque que ces déchets représentent pour la population. Le risque est proportionnel à l'activité des déchets avec lesquels la population est en contact. Or, pour une quantité donnée d'un radionuclide[35], plus la demi-vie de celui-ci est longue[36], plus l'activité (à un instant donné) est faible et moins graves sont, par conséquent, les risques encourus à cet instant[37]. (2) Le problème des déchets n'est pas insoluble. Des solutions existent, qui consistent, par exemple, à conditionner les déchets puis à les enfouir en couche géologique profonde (couche d'argile, dôme de sel ou massif de granit) de manière à les isoler de l'environnement durant le temps nécessaire pour que leur activité (c'est-à-dire le risque effectif) ait rejoint le niveau d'acti-

---

34 Les déchets nucléaires font l'objet du chapitre 5.

35 Correspondant à une certaine production d'énergie électrique.

36 Ce qui est généralement considéré comme *inadmissible* par le public, à cause de l'impact potentiel sur les générations futures.

37 La question essentielle est de déterminer le temps nécessaire pour que la somme des activités de tous les radionuclides contenus dans les déchets devienne inférieure à un niveau d'activité considéré comme 'naturel' (voir le point (2)).

vité du minerai d'uranium naturel dans l'écorce terrestre. Il convient de savoir que pour les déchets conditionnés[38] en provenance de combustible nucléaire 'retraité', ce temps est d'environ 1 000 ans ou 10 000 ans, selon que l'on considère le risque par ingestion ou par inhalation. Ces durées peuvent paraître extrêmement longues à l'échelle d'une vie humaine, mais elles sont en fait très courtes à l'échelle des temps nécessaires à la nature pour recycler dans l'environnement, des radionuclides enfouis en couche géologique, comme le montre l'observation des facteurs de transfert (dans l'homme) des radionuclides présents dans la croûte terrestre depuis des temps immémoriaux. En d'autres termes, l'isolation géologique est la protection la plus efficace de la biosphère contre le « recyclage » des déchets dans l'environnement.

L'existence de déchets nucléaires en Belgique est étroitement liée à la production d'électricité d'origine nucléaire, mais elle a également d'autres sources. La quantité de déchets nucléaires produite en Belgique est sans commune mesure avec celle des déchets qui auraient été produits si le parc nucléaire belge avait été remplacé par un parc de centrales classiques, avec la même répartition charbon/fuel/gaz que celle d'aujourd'hui[39]. Dans ce cas[40], chaque citoyen belge aurait produit annuellement 3,4 t[41] de CO_2 en plus de celles qu'il produit déjà. Le parc nucléaire produit, par habitant et par an, environ 500 g de déchets dont 10 g de déchets de haute activité. Le volume occupé par ces derniers correspond grosso modo à un dé à coudre[42].

À la fin de la production et du démantèlement du parc électronucléaire belge actuel, le pays sera confronté au stockage et à l'évacuation de quelque 100 000 m^3 de déchets provenant des installations nucléaires, si on y inclut les 30 000 m^3 de « déchets radium » actuellement entreposés à Olen et provenant de la fabrication du radium par MHO (Métallurgie Hoboken-Overpelt). Quelque 60 000 m^3 sont constitués de déchets de faible et moyenne activités et de faible demi-vie (« déchets de type A ») ; 10 à 13 000 m^3 (selon le type de traitement qui leur sera finalement réser-

---

38 Par « conditionnement » des déchets, on entend : (1) pour des déchets retraités, leur dilution dans un verre de type boro-silicate peu soluble dans l'eau ou (2) pour des déchets non-retraités, la mise des assemblages de combustible dans un conteneur étanche. Les Suédois qui ont refusé le retraitement du combustible, enferment les assemblages dans des conteneurs en cuivre qui, protégés par une couche de bentonite, sont isolés à 500 m de profondeur dans le granit (mine d'Aspö, près d'Oskarshamn).

39 Correspondant aux 45 % d'électricité non-nucléaire produite en Belgique.

40 Et en ne comptant que le seul CO_2, à l'exclusion des particules, des cendres et autres gaz.

41 Aux conditions normales de température et de pression, ceci représente un volume de gaz de 1 765 m^3.

42 Soit environ 3 cm^3 par personne et par an.

vé, incluant ou non le retraitement) sont des déchets de moyenne, haute ou très haute activité et de longue demi-vie (« déchets de type B et C »).

Plus de 60 % des déchets de type A sont d'origine électronucléaire, le solde provenant des secteurs de la recherche, de la médecine et de ce que l'on a coutume d'appeler les « passifs nucléaires », à savoir : les installations BP-1 (ancienne usine Eurochemic à Dessel) et BP-2 (ancien site « waste » du SCK•CEN à Mol). Il est frappant de constater que la durée de vie des centrales nucléaires *in fine* n'aura qu'un effet très secondaire sur les quantités de déchets de type A produites par le secteur électronucléaire puisque 2/3 de ces quantités seront issues du démantèlement des installations. La majorité des déchets de type B et C proviennent de l'utilisation du combustible nucléaire, du programme de recherche du SCK•CEN et du démantèlement d'Eurochemic.

Des solutions techniques existent pour l'entreposage et l'évacuation des différentes catégories de déchets même si, actuellement, on est beaucoup plus avancé dans la définition du concept de stockage des déchets de faible activité, que dans celui des déchets fortement radioactifs. Un programme ambitieux d'étude du stockage de déchets de haute activité vitrifiés, dans une couche d'argile de Boom située à quelque 200 m de profondeur sous le SCK•CEN à Mol, est actuellement en cours. Ce programme (Hades, Praclay), géré par NIRAS-ONDRAF en coopération étroite avec le Centre de Mol, est considéré dans le monde entier comme un des plus avancés en la matière. Dans tous les cas, quel que soit le concept de stockage des déchets de haute activité finalement adopté, la mise en œuvre de ce concept et la fermeture du site ne devront pas être réalisées avant 2040 ou 2050. Ceci, de manière à permettre aux déchets vitrifiés de refroidir suffisamment, afin de limiter au maximum l'élévation du champ de température in situ, une fois les déchets enfouis dans l'argile. Ce délai ne doit cependant pas retarder la mise en place des mesures que la génération actuelle doit prendre, de manière à garantir aux générations futures les moyens techniques et financiers nécessaires à la gestion appropriée d'un passif qui leur aura été légué sans qu'elles en aient été les bénéficiaires directs.

La gestion à court et à long terme des déchets radioactifs en Belgique incombe à NIRAS-ONDRAF, organisme fédéral[43] en charge de tous les déchets radioactifs présents sur le territoire. Elle comprend : (1) le traitement et le conditionnement des déchets en provenance d'installations ne

[43] NIRAS-ONDRAF (Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies) a été créé par la loi du 8 août 1980 (article 179 §2) et l'arrêté royal du 30 mars 1981. Ses missions ont été précisées par l'article unique de la loi du 11 janvier 1991, remplaçant la loi du 8 août 1980 et l'arrêté royal du 16 octobre 1991, modifiant et complétant l'arrêté royal du 30 mars 1981.

disposant pas d'équipements particuliers pour réaliser ces opérations, (2) l'entreposage et l'évacuation des déchets conditionnés. En ce qui concerne la gestion des matières fissiles enrichies, des substances plutonifères et des combustibles neufs et irradiés, NIRAS-ONDRAF est chargé (3) du transport et de l'entreposage des quantités excédentaires de ces matières en dehors des installations des producteurs et exploitants. NIRAS-ONDRAF est également chargé de (4) récolter toutes les informations nécessaires pour le déclassement des installations nucléaires, (5) informer le public sur tous les aspects relatifs aux déchets nucléaires, (6) constituer un fonds permettant la gestion à long terme de l'ensemble des déchets nucléaires. Enfin, la mission de NIRAS-ONDRAF a été récemment élargie[44] à l'établissement et à la tenue à jour d'un inventaire de toutes les installations nucléaires ainsi que de tous les sites contenant des substances radioactives en Belgique.

Pratiquement NIRAS-ONDRAF confie les activités industrielles de gestion à court terme des déchets radioactifs (hormis les transports) à sa filiale Belgoprocess qui assure à ce titre (et sous sa responsabilité), la gestion des sites BP-1 et BP-2 à Mol-Dessel. Il convient d'insister sur le fait que NIRAS-ONDRAF applique une politique d'assurance de qualité extrêmement rigoureuse dans le strict respect des procédures administratives et techniques réglant la gestion des déchets, afin de garantir la vigilance du contrôle. Les procédures et spécifications techniques sont établies par NIRAS-ONDRAF après approbation, par les autorités compétentes, des règles générales servant de base à l'établissement de critères d'acceptation des déchets. En tant qu'exploitant nucléaire, Belgoprocess est soumis à la même réglementation que les centrales nucléaires et fait l'objet d'un contrôle permanent par les organismes désignés par les autorités.

Depuis l'interruption en 1982 des opérations de rejet en mer des déchets conditionnés de type A, la destination finale étudiée pour ces déchets est le dépôt en surface ou en (faible) profondeur. À la date du 16 janvier 1998, le gouvernement fédéral a opté pour une solution définitive (ou pouvant le devenir) pour la gestion à long terme de ces déchets.

Les déchets de type B et C sont, dans l'état actuel des connaissances, destinés au dépôt final en couche géologique de moyenne profondeur (quelques centaines de m). Le programme de R&D relatif au dépôt final des déchets B et C, financé par les producteurs d'énergie électrique essentiellement, est en cours. Le programme actuel couvrant la période 1998-2003 représente un investissement de 2,3 milliards BEF. Il fait partie d'un programme prospectif jusqu'en 2013, qui se chiffre au total à 5 milliards BEF. À la fin de ce programme, la Belgique aura consacré au total de l'ordre de 11 milliards BEF à la R&D relative au dépôt en profondeur.

---

[44] Loi du 12 décembre 1997.

Le financement de la gestion à long terme des déchets repose sur la constitution d'un fonds spécial pour les opérations à long terme, alimenté par les provisions versées par les producteurs de déchets. La gestion de ce fonds, prévu par la loi, a été confiée à NIRAS-ONDRAF. Il doit permettre à cette dernière de développer les travaux nécessaires à la gestion à long terme des déchets radioactifs en Belgique. Le montant total pour couvrir cette gestion est estimé à environ 65 milliards BEF aux conditions économiques de 1999.

De son côté, la société Synatom constitue, sous le contrôle de l'État, des provisions pour frais relatifs à la gestion des combustibles nucléaires usés. Fin 1999, ces provisions s'élèvent à 70,3 milliards BEF. Electrabel de son côté, constitue, par le biais de contributions annuelles, une provision destinée à couvrir les frais de démantèlement des centrales nucléaires actuelles, conformément aux conventions conclues avec l'État et sous le contrôle du Comité de contrôle du gaz et de l'électricité. Cette provision devrait à terme atteindre le montant d'au moins 56,6 milliards BEF (1995). D'après les analyses extérieures dont on dispose aujourd'hui, cette somme paraît devoir satisfaire les besoins.

L'impact économique de la décision définitive éventuelle de ne plus procéder au retraitement des combustibles usés est actuellement à l'étude. Rien ne permet d'assurer que les montants nécessaires à la gestion définitive des déchets ne devraient pas être fondamentalement revus (à la hausse) si cette décision était prise.

Il importe de noter que la taille réduite de la Belgique et des installations de production d'énergie (par comparaison avec des pays voisins comme la France, l'Allemagne ou la Grande-Bretagne) ne permet pas de bénéficier des effets d'économie d'échelle. Même si la question de l'opportunité d'une gestion des déchets nucléaires au niveau international n'est pas à l'ordre du jour, elle mérite d'être posée !

En guise de conclusion, on peut dire que, quelle que soit l'évolution à court et moyen termes de la politique énergétique en Belgique, la gestion des déchets radioactifs et des combustibles nucléaires usés est en bonne voie. Des solutions techniques aux problèmes posés existent, même si les choix définitifs ne seront arrêtés que dans plusieurs décennies. Ce délai permettra d'ailleurs d'adapter les choix à l'évolution des connaissances dans le domaine. La gestion centralisée des déchets nucléaires permet un suivi très efficace des flux de matières et du financement de leur gestion à court et à long terme. Cette gestion est bien plus transparente que certaines pratiques actuelles ou passées (décharge de Mellery, etc.) en matière de déchets industriels entreposés, stockés ou traités dans une grande variété de sites et d'installations dont le contrôle est plus problématique et qui présenterait un niveau au moins équivalent de danger pour l'environnement. Les provisions constituées en vue du traitement, du conditionne-

ment et du stockage des déchets nucléaires permettront de mettre en place en temps voulu les mesures qui s'imposent soit au niveau national, soit dans un cadre international plus large. Il appartient aux organismes responsables et aux pouvoirs publics d'assurer leur pérennité et de prévoir les règles de suivi de leur disponibilité.

VII. La prolifération nucléaire

La fabrication d'une bombe atomique nécessite quelques kilos d'^{235}U ou de ^{239}Pu purs [45]. L'industrie nucléaire belge ne possède ou ne manipule ni l'un ni l'autre, à l'exception du Centre nucléaire de Mol qui utilise, pour les besoins de la recherche, de l'uranium (métallique) hautement enrichi comme combustible dans le réacteur BR2, lequel fait l'objet d'une surveillance toute spéciale[46]. Pour produire de l'^{235}U pur, il faut une usine d'enrichissement comme, par exemple, l'usine de Pierrelatte[47] (France). Quant au ^{239}Pu pur, il ne peut être produit que dans des réacteurs spécialement conçus à cet effet. Aucune de ces installations n'existe en Belgique.

Les réacteurs de puissance belges utilisent exclusivement de l'uranium faiblement enrichi (3,5 % en ^{235}U), avec lequel la construction d'un engin explosif est (techniquement) impossible. Par ailleurs, le fait que le combustible UO_2 des réacteurs PWR réside environ trois ans dans le cœur avant d'être déchargé à un taux d'épuisement d'environ 45 GWj/t[48], fournit un plutonium dont la composition isotopique inclut les nuclides ^{238}Pu, ^{239}Pu, ^{240}Pu, ^{241}Pu et ^{242}Pu. La présence de ^{238}Pu, ^{240}Pu et ^{242}Pu rend le plutonium (de première génération) extrêmement impropre à la construction d'une bombe[49].

Il ne faut pas nécessairement aller jusqu'à la construction d'une bombe pour exercer une action terroriste, voire effectuer du chantage à l'égard d'un État. On peut fort bien imaginer une action terroriste à partir de la manipulation de matière fissile impropre à la fabrication d'une bombe, conjuguée avec la menace de provoquer une contamination à

---

45 Les masses critiques d'^{235}U et de plutonium-239 métalliques (isotopiquement « purs »), dans une configuration géométrique de sphère « réfléchie », sont respectivement de l'ordre de 16 et 6 kg. En phase cristalline appropriée, la masse critique minimale de plutonium-239 est légèrement inférieure à 5 kg.

46 Il convient de mentionner le fait que les USA exercent une forte pression pour que le SCK•CEN remplace le combustible hautement enrichi du réacteur BR2 (HEU), par du combustible plus faiblement enrichi (LEU), donc moins proliférant. Le problème est à l'étude.

47 Produisant l'uranium hautement enrichi à usage militaire français.

48 Le taux d'épuisement (ou "*burn-up*") s'exprime en gigawatt/jour par tonne (GWj/t) de combustible.

49 Bien que sous la présidence de Jimmy Carter (1977-1981), les autorités américaines aient prétendu le contraire.

grande échelle. Ceci suppose toutefois le détournement d'une quantité appréciable de plutonium préalablement extrait de combustible irradié. La manipulation de ce plutonium n'est pas à la portée de n'importe quelle organisation terroriste compte tenu des moyens sophistiqués de protection physique des installations. On comprend aussi aisément qu'il est essentiel d'exercer une comptabilité rigoureuse des matières fissiles existant dans le pays, de manière à détecter de façon précoce, toute tentative de détournement de matière stratégique. Les détournements potentiels sont particulièrement importants à surveiller dans les usines du cycle de combustible.

Les préoccupations internationales face aux risques de dissémination des armements et de terrorisme nucléaire se sont traduites par diverses actions dans le cadre de l'ONU. C'est ainsi qu'à l'initiative des États-Unis, de l'Union soviétique et du Royaume-Uni, l'Assemblée générale des Nations unies vota en 1968, une résolution proposant à tous ses membres d'adhérer au Traité de non-prolifération des armes nucléaires (TNP). Les dispositions essentielles du traité prévoient que les pays disposant d'un armement nucléaire s'engagent à ne pas transmettre leurs connaissances en la matière, aux pays n'en possédant pas. Ces derniers renoncent à fabriquer des armes nucléaires ou à en acquérir, mais gardent leur droit souverain pour avoir accès aux applications pacifiques. Pour stimuler le développement de ces applications, les États signataires s'engagent à faciliter un très large échange de connaissances scientifiques, technologiques mais aussi d'équipements. Le respect des engagements du traité est contrôlé par l'Agence internationale de l'énergie atomique[50] (AIEA). Les nations signataires acceptent l'application de contrôle de l'AIEA sur la totalité des matières nucléaires dans leurs installations nucléaires. Le TNP a été ratifié par la Belgique en 1975[51].

Par ailleurs, la Belgique a joué un rôle clé lors des négociations des traités instituant le Marché commun et Euratom, dont la ratification remonte à 1957. Le traité d'Euratom instituait (avant le TNP) un contrôle des matières stratégiques, Euratom recevant un droit de propriété (plus juridique que commercial) sur l'uranium enrichi et sur le plutonium utilisés pour les besoins pacifiques. Pour éviter une superposition des contrôles Euratom et AIEA, un accord a été signé en 1973 selon lequel, la Communauté européenne a réorganisé son contrôle propre, les deux contrôles se faisant de manière conjointe.

Les installations nucléaires sur le territoire belge sont toutes soumises au contrôle Euratom-AIEA en ce qui concerne la comptabilité des matières stratégiques. Pour certaines d'entre elles, comme par exemple l'usine

---

50 Organisme émanant de l'ONU, créé en 1957 et basé à Vienne (Autriche).

51 Fin 1999, 187 pays ont ratifié le TNP, à l'exception notable de quelques pays comme l'Inde, le Pakistan et Israël.

Belgonucleaire de fabrication du MOX à Dessel, ce contrôle implique la présence permanente sur le site d'inspecteurs Euratom et AIEA, dotés de moyens de mesure et de contrôle propres. La comptabilité des quantités de plutonium est tenue de façon indépendante par les techniciens de l'usine et par les inspecteurs. Une fois par an, l'installation est totalement vidée de son contenu et l'inventaire en plutonium est établi au gramme près[52]. L'usine fait l'objet d'une protection renforcée secrète, ce qui exclut pratiquement tout risque de détournement mal intentionné de matière stratégique.

VIII. Les nouvelles générations de réacteurs

Les réacteurs en fonctionnement dans le monde totalisent à ce jour une durée de vie proche de 10 000 réacteurs/an. Ceux qui ont été construits en Occident et en Asie du Sud-Est sont sûrs et fiables selon les normes internationales actuelles. Cependant, il est raisonnable de penser que les niveaux de sûreté atteints aujourd'hui peuvent encore être améliorés[53].

Différentes technologies ont été appliquées pour la construction des centrales existantes ce qui fait qu'il y a peu de centrales (d'une même filière) identiques dans le monde. Ceci a fortement contribué à allonger les durées de mise en service et, par conséquent, a eu un impact négatif sur leur rentabilité économique. L'industrie nucléaire du monde occidental traverse une période difficile, du fait de l'absence de nouvelles commandes. Les deux raisons principales ont été évoquées plus haut :

Une attente plus longue (dans le cas du nucléaire) avant d'obtenir un rendement net positif du capital investi que dans le cas de centrales classiques fonctionnant, par exemple, au gaz naturel et l'hostilité d'une partie de l'opinion publique. Ces difficultés ont entraîné un regroupement important des industries du secteur. Seuls quelques constructeurs existent encore aujourd'hui, les autres ayant été absorbés dans les grands groupes. Des projets de réacteurs d'une nouvelle génération (la 3e), existent de part et d'autre de l'Atlantique et en Asie du Sud-Est. Ils pourraient être rapidement mis en œuvre si des conditions plus favorables étaient réunies.

Désireux de maintenir une capacité de production d'électricité nucléaire aux USA, un groupement d'industriels américains, NPOC[54], (incluant des constructeurs et des compagnies d'électricité) a procédé en 1990 à l'élaboration d'un plan stratégique devant sortir l'industrie de l'impasse

---

52 La marge d'incertitude porte sur les quantités de Pu évaporées sur les parois intérieures des boîtes à gants et dans les différents conduits de l'installation.

53 Les nouvelles générations de réacteurs font l'objet du chapitre 9.

54 Pour Nuclear Power Oversight Committee.

par une amélioration de la rentabilité économique des centrales du futur. L'élément principal de ce plan était la recherche d'une standardisation du concept ALWR[55] de réacteur à eau ordinaire de 3e génération développé par l'industrie et EPRI[56]. Cette standardisation devait permettre à la NRC[57] de délivrer des «certificats de conception» destinés à faciliter l'obtention du permis d'exploitation et réduire ainsi de manière sensible les délais de mise en service d'installations nouvelles. Une modification de la législation a été introduite et approuvée en vertu de laquelle la NRC peut délivrer un permis d'exploitation dans le cas d'un projet nouveau basé sur un concept de réacteur « standard », à construire sur un site ayant fait l'objet d'un permis d'utilisation préalable. À la fin de 1999, quatre concepts standards de réacteurs ont été approuvés par la NRC et ont obtenu leur certificat parmi lesquels, notamment : les projets AP 600 (APWR conçu par Westinghouse) et ABWR (General Electric)[58]. Les deux premiers réacteurs ABWR de 1 350 MWe construits par General Electric sont entrés en service au Japon fin 1998 (sur le site de Kashiwa-zaki Kariwa).

Fin 1991, une initiative semblable a été prise par les producteurs d'électricité de cinq pays européens[59] qui se sont associés pour définir les caractéristiques communes de réacteurs à eau légère de 3e génération qui devraient être construits en Europe, le concept ALWR/EPRI servant de modèle. Cette initiative connue sous le nom de EUR (*European Utility Requirements*) a abouti à la rédaction d'un rapport en quatre volumes. Bien que les autorités de sûreté nationales n'aient pas participé aux travaux, toutes leurs préoccupations ont été prises en compte. Sûreté et standardisation sont les éléments clés du dossier. Le document EUR est adopté aujourd'hui par la plupart des producteurs d'électricité en Europe. Le projet de réacteur EPR (*European Pressurized Water Reactor*) développé par NPI (Nuclear Power International), filiale commune de Siemens/KWU et Framatome, a été conçu selon les recommandations de ce document.

---

55 Pour *Advanced Light Water Reactors*, avec les distinctions : APWR (à eau sous pression) et ABWR (à eau bouillante).

56 Pour Electric Power Research Institute, laboratoire de recherche de l'industrie électrique américaine.

57 Pour Nuclear Regulatory Commission. La NRC est l'autorité de sûreté en matière nucléaire, aux USA.

58 Les certificats de la NRC ont été délivrés respectivement au concept ABWR en février 96 et au concept AP600 en décembre 97.

59 France, Allemagne, Espagne, Grande-Bretagne et Belgique.

Les principaux concepts de réacteurs de 3e génération à eau ordinaire (AP 600, ABWR, EPR, S80+, SBWR[60]) ont plusieurs caractéristiques communes. En particulier, la durée de vie (opérationnelle) des centrales est fixée à 60 ans. Les taux de disponibilité devraient se situer autour de 90 %. Les temps de construction prévus sont de l'ordre de 5 ans. Les taux d'épuisement du combustible (en UO_2 et/ou MOX) devraient atteindre des valeurs de l'ordre de 60 GWj/tonne. Les cycles de rechargement prévus sont de 24 mois, avec une durée maximum de 30 jours pour le rechargement et la maintenance. La sûreté des concepts garantit une probabilité de fusion du cœur inférieure à 10^{-5}/réacteur/an[61] et une probabilité de relâchement majeur dans l'environnement, inférieure à 10^{-6}/ réacteur-an. Certains concepts considérés comme intrinsèquement sûrs ont une probabilité d'endommagement du cœur plus faible : c'est le cas par exemple, du projet AP 600 (5.10^{-7}/réacteur-an), dans lequel de nombreux systèmes (injection de sécurité, injection d'eau borée dans le cœur, refroidissement du confinement par jet) sont de type « passif ». C'est également le cas du projet de réacteur SBWR (10^{-6}/réacteur-an). Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques principales des principaux concepts de réacteurs de 3e génération.

Tableau 1 : Caractéristiques principales des réacteurs de 3e génération et PWR

	EPR	S80 +	ABWR	AP 600	SBWR	GT-MHR
Puissance (MWe)	1450	1345	1356	600	600	≈ 300
Facteur de charge	0,87	0,9	0,86	0,9	0,9	0,8
Rendement	0,34	0,34	0,33	0,31	0,32	0,48
Combustible	UO_2 /MOX	UO_2 /MOX	UO_2	UO_2	UO_2	PuO_2
Cycle de rechargement (mois)	12 à 24	18 à 24	18 à 24	18 ou 24	18 ou 24	20
Burn-up (GWj/t)	> 60	60	60	Pas disp.	Pas disp.	≈ 700
Probabilité de fusion du cœur	$< 10^{-5}$ /an	$< 10^{-6}$ /an	$< 10^{-6}$ /an	$< 5\ 10^{-7}$ /an	$< 10^{-6}$ /an	Voir (a)
Durée de vie (an)	60	60	60	60	60	Pas disp.
Temps de construction (an)	5	4	4	3	3	Pas disp.
Sûreté passive	– (voir (b))	-	-	+	+	+

[60] Le concept S80+ (System 80 +) est un APWR conçu par ABB-Combustion. Le concept SBWR (*Simplified Boiling Water Reactor*) est une version simplifiée de l'ABWR de General Electric, d'une puissance limitée à 600 MWe.

[61] Rappelons une fois encore que, selon les normes américaines cette valeur doit être inférieure à 10^{-4} /réacteur-an et que dans les centrales actuelles (2ème génération), elle est de 5.10^{-5} /réacteur-an.

Les caractéristiques physiques de ce réacteur lui assurent des propriétés de sûreté intrinsèque telles qu'il est capable de surmonter une perte de fluide réfrigérant (en l'occurrence de l'He), sans que cette perte provoque une montée en température du cœur, aboutissant au relâchement des produits de fission. La probabilité de fusion du cœur est donc sans objet.

(-) indique que l'installation en question n'a pas d'éléments caractéristiques d'une « sûreté passive ». Le signe (+) indique le contraire.

Ces valeurs sont à comparer aux valeurs suivantes pour les réacteurs PWR en fonctionnement en Belgique[62] :

Tableau 2 : Caractéristiques des réacteurs PWR en fonctionnement en Belgique

	PWR
Puissance (MWe)	1 000
Facteur de charge	0,97
Rendement	0,33
Combustible	UO_2 /MOX
Cycle de rechargement (mois)	12 à 18
Burn-up (GWj/t)	de 45 à 55
Probabilité de fusion du cœur	10^{-5} /an
Durée de vie (an)	Indéfinie
Temps de construction (an)	de 8 à 10
Sûreté passive	-

Dans les réacteurs PWR en fonctionnement aux USA aujourd'hui, la dose collective annuelle du personnel des centrales est de 1,19 homme-Sv par centrale (en moyenne). Cette dose est en baisse régulière. Elle a diminué d'un facteur 4 depuis le début des années 1970. Étant donné les améliorations prévues en matière de radioprotection et les particularités des nouveaux concepts, on envisage d'abaisser la dose collective annuelle du personnel aux alentours de 0,5 homme-Sv pour une centrale ABWR et à une valeur inférieure à 0,7 homme. Sv pour un réacteur AP 600. Pour le réacteur EPR, en cas d'accident sévère, la protection de l'environnement est telle que l'on ne devrait pas prendre des mesures particulières avant un délai de 24h. Seules les personnes aux alentours immédiats de la centrale pourraient être évacuées.

Aux projets de réacteurs de 3e génération, il convient d'ajouter le projet international de réacteur HTGR[63] conçu pour « brûler » le plutonium militaire en Russie. Ce réacteur de 600 MWth, refroidi à l'hélium et

[62] En ce qui concerne la puissance électrique, nous avons indiqué celle des unités belges les plus récentes.

[63] Pour High Temperature Gas Cooled Reactor. Ce projet rassemble Minatom (Russie), General Atomics (USA), Framatome (France) et Fuji Electric (Japon).

couplé à une turbine à gaz pour la production d'électricité (avec un rendement proche de 0,5) est aussi connu sous le nom de GT-MHR[64]. Il devrait utiliser un combustible à base de particules enrobées dans du carbone pyrolitique, le combustible standard des réacteurs à haute température et à gaz. La composition isotopique du combustible après déchargement permettrait de traiter ce dernier comme un déchet, sans que cela pose des problèmes particuliers, ni du point de vue du stockage (à long terme), ni du point de vue risque de prolifération.

Dans le domaine des systèmes avancés, il convient aussi de mentionner l'intérêt pour les systèmes couplés « accélérateur-réseau sous-critique ». Ces systèmes ont une histoire ancienne. Ils ont été remis à l'ordre du jour il y a quelques années par le prix Nobel de physique Carlo Rubbia et sont connus également sous le nom de systèmes ADS[65]. Leur principe est le suivant : un faisceau de protons est accéléré à l'aide d'un cyclotron jusqu'à une énergie de quelques centaines de MeV et est envoyé sur une cible de noyaux lourds. Par réaction de spallation[66] avec les noyaux de la cible, les protons à haute énergie produisent des neutrons de 14 MeV en quantité importante. La cible étant entourée d'un réseau sous-critique, ces neutrons sont « multipliés », comme dans un réacteur classique et fournissent de l'énergie par réactions de fission. La différence essentielle avec les installations classiques réside dans le fait que, le système étant sous-critique ($k<1$), un accident de criticité y est, par définition, exclu.

Dans la proposition initiale de Rubbia, les systèmes ADS étaient censés remplacer à terme les réacteurs de la 2e génération, de manière à produire de l'électricité nucléaire à partir de systèmes plus « sûrs ». Cette idée semble abandonnée aujourd'hui. Toutefois, un grand intérêt subsiste pour les systèmes ADS dans la mesure où des installations de ce type permettraient (dans un premier stade) d'étudier la possibilité de transmuter[67] des actinides mineurs à longue demi-vie que l'on retrouve dans les déchets de haute activité, en noyaux à demi-vies plus courtes et ouvrir ainsi de nouvelles perspectives pour la résolution de ce problème.

Le SCK•CEN travaille actuellement sur un projet d'installation de type ADS du nom de MYRRHA. Ce projet[68], parmi les plus avancés au monde dans ce domaine, est basé sur le principe décrit ci-dessus. Il de-

---

64 Pour Gas Turbine-Modular Helium Reactor. Un projet de réacteur de ce type est en cours d'étude en Afrique du Sud.

65 Pour Accelerator Driven Systems.

66 La *spallation* est une réaction nucléaire qui peut être décrite (en termes classiques) comme l'évaporation de certains constituants du noyau.

67 La question de la « partition et transmutation » des actinides mineurs est traitée en détail dans l'Appendice A du rapport (en anglais).

68 En collaboration avec IBA pour la partie accélérateur.

vrait permettre d'effectuer des recherches dans le domaine des irradiations de matériaux à haut flux de neutrons dont l'étude de la transmutation des actinides mineurs.

Toutes les valeurs qui ont été données plus haut pour les caractéristiques des concepts de 3e génération, constituent des améliorations notables par rapport aux réacteurs actuels. Toutefois, aux yeux de l'administration américaine (USDOE[69]), les réacteurs de 3e génération n'éliminent pas complètement le danger de prolifération. C'est la raison pour laquelle l'administration a lancé récemment une initiative intitulée NERI[70], dans le but de promouvoir de la recherche visant à définir des concepts de réacteurs entièrement nouveaux (de 4e génération), qui seraient : (1) très économiques, (2) résistant à la prolifération, (3) à sûreté renforcée, (4) minimisant la production de déchets. Cette initiative à long terme (plus de 20 ans) a reçu l'appui de neuf pays[71] invités à collaborer à l'identification des concepts nécessaires pour faire face à une demande mondiale en électricité qui pourrait croître de manière importante à moyen terme.

IX. La fusion thermonucléaire contrôlée

La « fusion » de deux noyaux légers en un noyau plus lourd[72] est source d'énergie (nucléaire) comme la « fission » d'un noyau lourd. C'est même la source d'énergie la plus répandue dans l'univers puisque c'est elle qui est à la base du rayonnement stellaire. Contrairement à la fission qui met en jeu une particule neutre, insensible à l'interaction coulombienne, la fusion fait intervenir des particules chargées de même signe exerçant entre elles des forces de répulsion. Pour surmonter ces forces et mettre les noyaux concernés « en présence », à des distances telles que le mécanisme de fusion soit enclenché, il faut élever la température du milieu (appelé plasma) à des valeurs très élevées : quelques dizaines de millions de degrés. Différentes possibilités existent pour « confiner » le plasma : soit l'utilisation de champs magnétiques intenses, soit l'utilisation de faisceaux laser qui, en plus du confinement, ont pour effet de comprimer le plasma, de manière à déclencher le processus de fusion. Dans le premier cas on parle de confinement magnétique, dans le second, de confinement inertiel. Un simple énoncé du principe permet d'entrevoir les difficultés (technologiques) de réalisation du processus. Lorsque celui-ci

---

69 Pour United States Department of Energy, le ministère américain de l'énergie.

70 Pour Nuclear Energy Research Initiative.

71 Afrique du Sud, Argentine, Brésil, Canada, Corée, Etats-Unis, France, Grande Bretagne et Japon. Une déclaration de coopération a été annoncée, par ces pays, à Washington, en février dernier.

72 Plus précisément la fusion de deux noyaux de deutérium (D) ou d'un noyau de deutérium et un noyau de tritium (T), en un noyau d'hélium (He).

sera parfaitement maîtrisé, l'humanité disposera d'une source quasi inépuisable (la masse d'eau des océans) d'énergie ne produisant pas de déchets à longue demi-vie, mais à un prix qu'il est malheureusement impossible de prédire aujourd'hui. En particulier, la compétitivité économique de la fusion dans l'avenir, dépendra étroitement du coût des autres moyens de production d'électricité.

La fusion fait l'objet de recherches avancées depuis le début des années 1950. Des progrès considérables ont été accomplis dans le domaine scientifique et technique, qui permettent d'entrevoir l'utilisation de la fusion pour la production d'énergie électrique à long terme. C'est-à-dire, bien au-delà de l'horizon 2020 établi pour la Commission AMPERE[73].

S'il est vrai que la fusion est source d'énergie à long terme, cela ne veut pas dire qu'il faille s'en désintéresser dans le moyen terme. En particulier, il est essentiel que des investissements soient réalisés dans les prochaines années pour une installation expérimentale (ITER), devant servir d'étape suivante dans la marche vers la définition d'un réacteur commercial. Dans l'état actuel des choses et compte tenu de l'importance donnée au marché dans l'orientation des choix énergétiques, les responsables politiques ont un rôle important à jouer pour que toutes les conditions nécessaires soient réunies qui garantissent une chance de succès maximum aux solutions d'avenir, comme la fusion.

X. Conclusion

L'énergie nucléaire souffre d'une mauvaise image de marque auprès d'une partie de l'opinion publique et de la difficulté de concilier la mise en place d'installations nouvelles avec les impératifs actuels du marché. De ce point de vue, le gaz naturel est certainement mieux adapté malgré les handicaps qui sont les siens[74]. Ces deux facteurs expliquent dans une très large mesure, la crise traversée actuellement.

L'énergie nucléaire offre cependant des avantages indéniables dans la perspective du développement durable comme l'établit ce rapport. Au nombre de ceux-ci, il convient de noter tout spécialement son incidence quasi nulle sur l'évolution du climat : les centrales nucléaires actuelles ont permis à la Belgique de faire une économie substantielle de rejets, en matière de CO_2 (environ 35 millions de tonnes par an par rapport au charbon)

---

[73] C'est la raison pour laquelle les textes relatifs à la fusion sont inclus sous forme d'*appendices* dans le rapport de base.

[74] Emissions de gaz à effet de serre, possibilité de fluctuations importantes des prix sur le marché et réserves mondiales limitées.

Le problème des déchets de haute activité, auquel le public est très sensible, n'est pas insoluble. Malgré la densité de population très élevée en Belgique, des solutions existent pour isoler ces déchets dans une couche géologique stable, de manière telle que la santé de nos descendants ne soit nullement affectée par leur présence, endéans la durée nécessaire pour les faire décroître en dessous du niveau d'activité naturelle.

En ce qui concerne l'aspect « sûreté », il convient de répéter que peu d'installations industrielles atteignent les niveaux actuels de sûreté des centrales nucléaires en Occident. La sûreté a toujours été une préoccupation majeure de l'industrie nucléaire, parfaitement consciente que sa survie en dépend. Si les niveaux de sûreté atteints aujourd'hui dans les centrales à eau légère sont élevés, les concepts développés dans les projets de réacteurs de 3e génération montrent qu'il est encore possible de renforcer la sûreté de manière significative.

Enfin, du point de vue de la rentabilité économique, il faut rappeler qu'en matière de centrales nucléaires ce sont les frais fixes (les investissements) qui représentent la charge financière essentielle, les montants variables (liés au combustible et à l'exploitation des centrales) étant beaucoup moins importants. Pour les centrales de la génération actuelle, l'absence de standardisation au niveau des concepts (et des équipements) et les procédures compliquées d'octroi de permis d'exploitation qui en ont résulté, particulièrement aux USA, ont parfois entraîné une très mauvaise rentabilité du capital. Et, par voie de conséquence, une absence de nouvelles commandes depuis plus de 20 ans. Les principes de standardisation et l'octroi des certificats de la NRC, adoptés pour les centrales de 3e génération, devraient changer cet état des choses aux USA, si une volonté politique de reprise du nucléaire se manifestait. La situation en Europe est semblable à celle des USA.

Désarmement et plutonium

Dix ans d'action par les milieux académiques

André L. JAUMOTTE, Alain MICHEL et
Pierre GOLDSCHMIDT

Professeur émérite à l'Université de Bruxelles
Consultant
Ancien directeur général adjoint de l'AIEA

Face au battage qui entoure les réunions des pouvoirs politiques : G8, déclarations présidentielles américaines ou russes, etc., on oublie parfois que ces déclarations et prises de position sont le résultat du travail des « hommes de l'ombre » que sont leurs conseillers politiques et scientifiques, eux-mêmes soutenus par les travaux des académies scientifiques, des groupes de travail proches des universités et autres « *think tanks* », etc.

C'est ainsi que l'on rencontrait ces conseillers discrets mais influents au début des années 1990 autour du MIT et Princeton aux USA, des universités du Sussex (SPRU), d'Oxford ou de Southampton en Grande-Bretagne, de celle de Francfort (PRIF) en Allemagne, des académies russes, Pugwash et tout particulièrement en Italie à l'Academia dei Lincei.

L'importance de la recherche scientifique et technique liée à la défense des États-Unis est bien connue. L'Académie nationale des sciences de ce pays (NAS) comprend une « Commission pour la sécurité internationale et le contrôle des armements » (CISAC), crée en 1980. Elle était présidée par le professeur Panofsky. La CISAC avait des contacts avec le groupe homologue de l'Académie des sciences d'URSS. Le professeur Panofsky souhaitait étendre de tels contacts avec les Académies des sciences de l'Europe occidentale. Il était important pour lui de combler le vide existant entre la perception politique et la réalité scientifique et technique.

L'appel de Panofsky fut entendu par l'Académie nationale des sciences, dei Lincei, italienne, plus audacieuse que les autres. Ainsi sont nées les *conférences Amaldi*, réunies chaque année, auxquelles étaient

invités en outre, des représentants de l'Académie des sciences de l'URSS puis de Russie, des pays de l'Est et des pays d'Europe occidentale.

À l'initiative du professeur André Jaumotte, représentant l'Académie royale de Belgique aux conférences Amaldi, une synthèse des possibilités de recyclage du plutonium tant civil que militaire fut présentée par Alain Michel en juin 1989 à l'Academia dei Lincei. Si la position des Russes alors était déjà favorable au recyclage du plutonium vu leurs développements de surgénérateurs, les Américains y étaient par contre très opposés, craignant comme chaque fois que l'on parlait recyclage, une prolifération accrue des armes nucléaires. Un article de Thomas Cochrane avait soutenu aux USA quelques années plus tôt l'idée de recycler l'uranium des armes mais il suggérait d'immobiliser le plutonium avec les déchets radioactifs. À la fin des années 1980, les Européens, impliqués seulement indirectement dans le devenir des matières fissiles issues du démantèlement des armes nucléaires suite aux accords en cours entre Russes et Américains, étaient plutôt réticents à joindre le problème d'origine militaire au recyclage du plutonium civil, que plusieurs pays européens favorisaient, craignant que cela ne jette le discrédit sur cette dernière activité.

C'était particulièrement vrai pour Belgonucleaire à l'époque, raison pour laquelle la publication de cette présentation dans le bulletin de la Classe des sciences de l'Académie royale de Belgique[1] est expurgée de l'aspect militaire, pourtant le but premier de la présentation faite à Rome. Rappelons les principaux arguments mis en avant alors pour ce recyclage du plutonium issu du démantèlement des armes sous forme de MOX :

- Dans les deux cas le plutonium est déjà séparé des combustibles irradiés, résultat de décisions antérieures, et soigneusement stocké sous bonne garde.
- Le plutonium militaire est d'autant plus facile à transformer en MOX qu'il contient moins d'isotopes Pu 240, 241 et 242.
- Pour la même raison, les conditions de travail sur la chaîne de fabrication seraient facilitées.
- Participer au désarmement – *forge our swords into plowshares*, devise de l'ONU – devrait être une image positive pour le MOX.

Il était clair cependant que pour que cela ne provoque pas d'inquiétudes nouvelles, tout plutonium recyclé devait être clairement transféré préalablement, sans doute au stade de sa transformation en oxyde, sous le contrôle de l'IAEA.

---

1 André Jaumotte, Jean van Dievoet et Alain Michel, *MOX fuels : the best utilization of plutonium now* (expurgée dans la publication par l'Académie des sciences de son aspect militaire, à la demande de BN), Ac.1989-10.

Autorisés par Belgonucleaire mais ne la représentant pas, nous eûmes ainsi que Julien Goens, la possibilité de défendre cette position dans les réunions des groupes cités plus haut et notamment face à certains scientifiques qui influencèrent les positions de leur gouvernement sur ce sujet ; par exemple, Panofsky ou Garwin aux USA, William Walker, Franz Berkhout ou John Simpson en Grande-Bretagne, Harald Müller et Annette Schaper en Allemagne.

Notre présentation en 1992[2] à la conférence Amaldi insistait sur la montée des stocks : 650 t de plutonium civil et 260 t de plutonium militaire, usuellement qualifié de « *weapons-grade* ». Il fallait décider du mode de stockage, peut-être international et des installations MOX à construire à l'exemple des Russes. Un accord gouvernemental franco-russe avait en effet été signé en novembre 92 pour développer le recyclage du plutonium militaire en Russie. Un accord semblable existait d'autre part entre Russes et Allemands.

En 1993[3] nous insistons sur le fait qu'il est temps de passer aux actes : en effet, les lieux de débat se sont multipliés, les études aussi mais les mesures pratiques tardent. La Commission européenne est entrée à son tour dans la partie et tend à coordonner les diverses propositions au sein d'un nouvel organisme de coopération avec la Russie auquel participent aussi le Japon et les USA : l'*International Science and Technology Center* dont le but premier est « *to give weapons scientists and engineers in the Russian Federation and if interested in other states of the CIS and Georgia, opportunities to redirect their talents to peaceful activities* ». Un programme de pré-démonstration sur le recyclage du plutonium associant les Européens et les Russes doit durer 3 ans et être suivi du recyclage des stocks en une vingtaine d'années. Mais ce projet tarde à être mis en pratique.

Les USA sont toujours opposés à ce recyclage et souhaitent « immobiliser » le plutonium en le mélangeant à des déchets hautement radioactifs pour le rendre inaccessible. Le Japon se sent mis sur la touche dans ces débats mais préconise que les deux voies soient approchées.

En quoi les académies pouvaient-elles jouer un rôle ? Ce sont les politiques, écrivions-nous alors, qui doivent décider mais en s'appuyant sur l'expertise la plus indépendante possible. Le milieu académique peut apporter la connaissance mais aussi la distance et l'indépendance de jugement par rapport aux intérêts économiques et politiques qui sont en jeu.

---

2 André Jaumotte et Alain Michel, *Recycling also military plutonium*, Ac.5-9 92.

3 Alain Michel et André Jaumotte, *Recent advances in recycling military plutonium : too many words, too few actions*, 1993.

Ce point de vue sera notamment défendu au sein de Pugwash[4] mais aussi dans les groupes universitaires mentionnés plus haut.

L'idée de recycler ce plutonium militaire fait son chemin et en 1994, nous écrivons que la question est passée dans les media de l'indifférence et l'ignorance à l'agressivité et l'anxiété[5]. Mais nous pouvons maintenant mettre en avant l'expérience acquise en Europe par le recyclage de 10 t de plutonium en 300 t de MOX dans les centrales nucléaires, le plutonium devenant une ressource énergétique au lieu d'être un déchet.

Les industriels belges vont également prendre l'initiative (voir la contribution traitant de Belgonucleaire) et en janvier 1994, dans un article très remarqué paru dans le Wall Street Journal, Pierre Goldschmidt alors directeur général de Synatom et Président de l'Institut de l'Uranium (basé à Londres) plaide pour le recyclage annuel de 10 t de plutonium récupéré des ogives nucléaires russes et américaines démantelées dans des réacteurs à eau légère américains[6]. En avril de la même année, il présente à Hiroshima, avec Pierre Verbeek, une analyse économique détaillée[7] démontrant, sur la base de données commerciales concrètes, que le recyclage de 100 t de plutonium militaire sous forme de MOX, coûterait de 1 à 2 milliards de dollars de moins que sa vitrification en tant que déchet suivi de son stockage géologique.

Le bien fondé du recyclage du plutonium d'origine militaire dans des centrales électriques est rappelé lors d'un séminaire aux États-Unis en septembre 1994[8], et au Japon en février 1995[9] et surtout lors d'un séminaire organisé par l'Ambassade de Belgique à Washington en juillet 1996[10]. Il y est montré que l'utilisation du plutonium militaire américain excédentaire pour la production d'électricité constitue une « *win-win-win solution* » : pour le Gouvernement américain, pour les électriciens améri-

---

4 André Mechelynck et André Jaumotte, *Can we forge our swords into plowshares,* Ac.7-12 93.

5 André Jaumotte et Alain Michel, *Recycling military plutonium : the academic community has a definite role to play*, Ac. 7-12 94.

6 P Goldschmidt, *Corral Plutonium for Peaceful Use,* The Wall Street Journal Europe, January 14-15, 1994.

7 P. Goldschmidt and P. Verbeek, *The Disposition of Plutonium from Dismantled Warheads : a West European Electric Utility View*, Nuclear Europe Worldscan, May-June 1994.

8 P. Goldschmidt, *Plutonium and Peace, the Point of View of an European,* International Uranium Fuel Seminar, Nuclear Energy Institute, Beaver Creek (Colorado), September 25-28, 1995.

9 P. Goldschmidt, *Plutonium Recycling : a Question of Timing*, Kyoto, 6 February 1995.

10 P. Goldschmidt, *Weapons Plutonium for Electricity : a Win-win-win Solution,* Belgonucleaire seminar on MOX technology for disposition of excess weapons plutonium, Washington DC, July 9, 1996, in *Energy and Environment*, vol 8, n° 1, 1997.

cains, et pour la communauté internationale qui aurait ainsi la garantie de l'irréversibilité du désarmement tout en favorisant les économies de ressources naturelles.

Les mêmes arguments en faveur du recyclage du plutonium militaire pour la production d'électricité sont présentés en 1996 devant la Commission des Finances et des Affaires économiques du Sénat[11] et développés lors d'un « workshop » organisé par Pugwash en décembre 1998[12].

Mais revenons quelques années avant sur la publication qui va marquer un tournant dans l'évolution de la résolution de ce problème, la sortie du rapport « *Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium* » en janvier 1994, publié par la *National Academy of Sciences* des USA. Ce rapport met sur un pied d'égalité les deux voies potentielles. Lors du débat qui suit la présentation de notre « état des lieux » à la conférence Amaldi, le professeur Panofsky, *Plutonium Study Chair du Committee on International Security and Arms Control* qui a préparé ce rapport, met en avant que le choix dépendra de la comparaison des risques de prolifération, du délai dans lequel l'utilisation du plutonium deviendra une nécessité socio-économique, de la nécessité ou non d'harmoniser internationalement les solutions choisies. Dans une certaine mesure, on peut dire que l'expérience belge en ce domaine et notre obstination à la mettre en avant, a joué un certain rôle dans les conclusions de la NAS qui à leur tour, vont peser lourd dans les choix ultérieurs.

Aussi en 1995, nous revenons sur le sujet. Comme on peut le constater dans la bibliographie de ce document[13], il est devenu l'objet d'un débat intense. Notre présentation cette fois encore, insiste sur l'expérience acquise non seulement en Belgique mais aussi en France ou en Grande-Bretagne. Elle fait aussi le point sur la poursuite des études aux USA, notamment au sein de l'ANS *Special Panel on the Protection and Management of Plutonium*, présidé par Glenn Seaborg, le découvreur du plutonium. De plus en plus, la solution apparaît comme liée à la volonté des pouvoirs politiques et non à la disponibilité de solutions techniques. Au cours de la conférence de révision du TNP en mai 1995, le Comité III « *welcomes steps taken by several states parties to dismantle and destroy thousands of nuclear weapons and to convert nuclear material formerly produced for military purposes to civil activities* ». Les efforts des

---

11 Auditions de P. Goldschmidt au Sénat de Belgique : *Le plutonium et la non-prolifération,* 27 mars et 18 décembre 1996

12 P. Goldschmidt, *The Disposition of Separated Plutonium Stocks,* Pugwash Workshop on the prospects of nuclear energy, Paris 4-5 December 1998, in *Nuclear Energy – Promise or peril*, World Scientific Publishing Co. 1999, chapter 13.

13 André Jaumotte et Alain Michel, *The technical promise and the needed capacity for burning weapons grade plutonium as MOX fuel in commercial light water reactors,* Ac. 7-12 95.

conseillers soutenant le travail des diplomates en marge de la conférence n'ont pas été vains.

Ce qui nous permet en 1996 de poser la question : « *Recycling military plutonium : has real action started at last ?* »[14]. En effet le niveau des réunions décisionnelles est monté d'un cran : l'OECD s'est emparé du sujet, un groupe commun US-Russie a publié un rapport mais surtout le G7+1 a provoqué une réunion d'experts à Paris en octobre 96, aux 150 participants venus des pays du G7 et de la Russie, s'étaient joints deux pays expérimentés dans le recyclage du plutonium : la Belgique et la Suisse. Les débats furent intenses et pas toujours exempts de pressions politiques. Le MOX fut reconnu comme offrant les meilleures perspectives dans l'immédiat mais l'immobilisation devait être considérée pour certaines formes de plutonium jugées non recyclables. Le MOX répondait le mieux à un nouveau critère défini aux USA : le *Spent Fuel Criteria*. Vu l'urgence du problème militaire, il était recommandé d'utiliser les usines existantes pour réaliser les *Lead Test Assemblies*. On espérait donc progresser rapidement mais nous verrons qu'il a fallu encore près de dix ans pour que ces premiers assemblages soient fabriqués, non pas hélas en Belgique comme le demandaient les USA, mais en France à Cadarache suite à l'incapacité décisionnelle du gouvernement belge sur ce sujet, le ministre de l'Énergie Olivier Deleuze ayant refusé de donner son accord à la venue en Belgique de 140 kg de plutonium militaire américain.

Les présentations suivantes aux conférences Amaldi reflètent une certaine lassitude face aux incertitudes qui continuent à peser sur ces programmes. En 1997, nous faisons simplement brièvement le point[15] : si nous sommes passés en près de 10 ans de l'utopie de quelques-uns aux débats politiques, il reste un grand nombre d'obstacles politiques et financiers à surmonter. Les USA ne progresseront que si les Russes font de même. Pessimistes, nous écrivons que « ce n'est pas demain la veille » que nous verrons brûler du plutonium militaire dans un réacteur civil, mais que nous faisons nôtre la devise de Guillaume d'Orange : « il n'est pas nécessaire d'espérer pour entreprendre, ni de réussir pour persévérer ».

En 1998, la conférence Amaldi se tient à Moscou et nous pouvons nous féliciter de ce qu'un nouvel accord US-Russie prévoit que chaque pays traitera 50 t de son stock de plutonium militaire pour le rendre impropre aux usages militaires. Notre présentation[16] plaide en faveur d'un

---

[14] André Jaumotte et Alain Michel, *Recycling plutonium : has real action started at last*, Ac.7-12 96.

[15] André Jaumotte et Alain Michel, *Recycling military plutonium : a brief note on the situation*, Ac.07-12 97.

[16] André Jaumotte et Alain Michel, *Plea for a civilized use of plutonium, Amaldi conf.*, Moscow 1998.

usage généralisé du plutonium dans les centrales nucléaires, qu'il vienne des stocks civils ou militaires. Mais nous en sommes loin, certains comme la Grande-Bretagne restant indifférents à la croissance de leur stock. Une évolution cependant : l'obligation – restée informelle néanmoins – de déclarer ses stocks civils et le programme envisagé pour les gérer, ceci dans le cadre des nouvelles *Guidelines for the Management of Plutonium*. La Belgique a pris une part active dans l'élaboration de ces règles, en collaboration avec les 5 pays détenteurs « agréés » d'armes nucléaires et les 4 autres pays gestionnaires de plutonium civil uniquement : Japon, Allemagne, Suisse et Belgique.

Autre progrès : aux USA, l'appel d'offres pour la réalisation d'une usine MOX pour traiter les 34 t recyclables de plutonium militaire est lancé. La Belgique va y répondre (voir contribution sur BN). Le programme passe clairement de l'ère politico-académique à l'ère industrielle et financière.

En 2000, la BNS organise, la conférence Plutonium 2000[17]. Plus de 300 participants se réunissent à Bruxelles, venus du monde entier. Les milieux académiques sont présents une fois de plus. Concluant cette conférence, le président Paul Govaerts souligne que l'élimination des stocks existants demande la plus haute priorité ce qui requiert non seulement des moyens techniques mais aussi le dialogue et la transparence des actions. Aux gouvernements de prendre les décisions appropriées.

Les avancées en matière de traitement du plutonium d'une part, la montée des préoccupations face à l'évolution de la situation politique internationale (Corée du Nord, Irak, Iran, etc.) et la crainte croissante d'actes de terrorisme d'autre part, ont réorientées l'action des milieux académiques belges intéressés par les aspects politiques du nucléaire, vers les moyens et législations susceptibles de mieux contrôler les exportations. C'est ce que reflètent les deux dernières présentations aux conférences Amaldi[18]. La question ne peut d'ailleurs se traiter efficacement en Europe qu'au niveau de l'Union européenne pour ensuite répercuter les règles établies sur les comportements et législations nationales. De plus, les contrôles de la non-prolifération des armes et moyens d'accéder aux armes de destruction massive, ne se limite plus ni au plutonium ni au nucléaire, mais aussi à l'ensemble des moyens chimiques et bactériologiques et à leurs porteurs. En ce domaine, l'université de Liège a développé une compétence reconnue.

---

17 *Plutonium 2000 conference* : a summary of the main topics related to the Amaldi conference AC.7-12 2000.

18 Quentin Michel, *Nuclear Non-Proliferation : the European Union Export Control Regimes : from Cooperation to Harmonisation, Proceedings of the XII Amaldi Conference*, Mainz, 1999 ; *Could export control regimes contribute to counter the acquisition of WMD by sub-nationals* ?, 2002.

PARTIE VII

LE CADRE INTERNATIONAL

NON-PROLIFÉRATION NUCLÉAIRE (AIEA), DÉSARMEMENT, CONTRÔLE DES EXPORTATIONS ET LUTTE CONTRE LE TERRORISME

Politique de la Belgique en matière de non-prolifération dans le cadre du TNP et de l'AIEA

Michel ADAM

Ambassadeur honoraire
ancien Représentant permanent de la Belgique auprès de l'AIEA
ancien membre du Conseil des Gouverneurs de l'AIEA

I. Introduction

Les impératifs de la non-prolifération et de la coopération européenne dans le domaine de la maîtrise des armements nucléaires restent des éléments essentiels de la politique extérieure de la Belgique au début du 21e siècle. Le contexte international est toutefois marqué par l'émergence de menaces nouvelles, terrorisme nucléaire et apparition de capacités nucléaires militaires d'états refusant les contraintes du Traité de non-prolifération des armes nucléaires (T.N.P.).

Dans un document adressé à la Chambre des représentants et au Sénat, en réponse à des résolutions adoptées par les deux assemblées en 2005, relativement au volet non-prolifération et désarmement nucléaire de la politique extérieure belge, le ministre des Affaires étrangères, M. De Gucht, mettait l'accent sur la nécessité d'une coopération internationale efficace pour protéger la population belge contre risques et menaces et ce en tenant compte de « *paramètres fonctionnels précis, à savoir notre adhésion aux organisations internationales compétentes et le respect de nos engagements internationaux* ».

En raison de la multiplicité des enceintes internationales abordant les thèmes de la sécurité, du désarmement nucléaire et de la non-prolifération, il importe de veiller tout particulièrement à maintenir une approche cohérente dans la défense de nos objectifs à long terme – qui correspondent à ceux du Traité de non-prolifération – en fonction des ordres du jour et des « *opportunités spécifiques* » qui se présentent dans les diverses organisations dont les principales sont les suivantes :

- Le Conseil de sécurité et l'Assemblée générale (et sa Première commission) ainsi que la Conférence du désarmement des Nations unies.
- L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA).
- L'Union européenne et l'OTAN.
- Les Conférences internationales organisées dans le prolongement du TNP.

II. La Belgique et le TNP

Plusieurs déclarations officielles du Gouvernement belge l'ont confirmé, la Belgique fait du TNP la « *pierre angulaire* » du régime international de non-prolifération nucléaire et la base de la poursuite du désarmement nucléaire et de la coopération internationale en matière d'utilisation pacifique de l'atome. Cette conception se traduit par l'engagement de la diplomatie belge en faveur du système des garanties et par la part qu'elle a prise dans la négociation du *Protocole additionnel* qui est, en raison de son importance, traité séparément.

C'est dans cet esprit que la diplomatie belge a préparé les conférences d'examen du TNP de 2000 et 2005. Ces deux réunions ont donné des résultats décevants : en matière d'application des décisions pour la première, par l'absence de consensus dans une situation pourtant marquée par des préoccupations de plus en plus lourdes liées aux programmes nucléaires de la Corée du Nord et de l'Iran pour la seconde. La Belgique déplore en particulier que la Conférence de 2005 n'ait pu déboucher sur l'adoption d'un document final substantiel, en raison d'un manque de volonté politique et d'une attitude de repli méfiant de certains états qui ont abusé des débats de procédure pour rendre toute décision impossible.

Pourtant, un groupe de haut niveau des Nations unies (*UN High Level Panel on Global Threats and Challenges*) avait établi un « catalogue de priorités et de scénarios de solutions » publié début 2005. Par ailleurs l'Union européenne avait formulé un certain nombre de propositions et un groupe de pays comprenant la Belgique avait diffusé un document de travail reprenant divers éléments clés du débat, document formulé de façon à pouvoir servir de base à un consensus (NPT/Conf.2005/WP35).

Ces péripéties illustrent la difficulté d'actualiser le TNP pour maintenir sa pertinence et pour faire face aux nouveaux défis en matière de sécurité internationale. La Belgique défend l'idée d'une évaluation internationale, sur la base régulière, du respect des dispositions du Traité pour accroître la transparence, contribuer à la responsabilisation des états membres, proposer des améliorations pour l'avenir et ainsi renforcer la confiance des états membres et de leur population dans le rôle du TNP.

III. Initiatives diverses

La Belgique continue par ailleurs d'accorder la plus grande attention à une approche équilibrée de toutes les composantes du TNP. Dans le domaine du désarmement, il convient de souligner l'importance de la *Résolution 1540* du Conseil de sécurité des Nations unies dont il est question plus loin. S'étant associée avec les autres membres de l'Union européenne à « l'initiative de sécurité contre la prolifération » (ISP), visant à agir contre les transports illégaux d'armes de destruction massive ou de leurs composants, la Belgique s'est engagée à assumer des responsabilités à la mesure du rôle qu'elle assume, de par sa situation géographique et en tant que plate-forme et relais logistique des transports internationaux.

Dans la même approche globale, le Gouvernement belge a adhéré en 2004 au Partenariat mondial contre la prolifération des armes de destruction massive lancé en 2002 dans le cadre du G8 et participe aux programmes de démantèlement de divers systèmes d'armements (par ex. sous-marins nucléaires russes). La Belgique est aussi partenaire de la « *Global Threat Initiative* », créée à l'initiative de l'AIEA, des États-Unis et de la Fédération de Russie et qui vise à sensibiliser les états aux dangers présentés par les matières nucléaires très sensibles et autres matières radioactives potentiellement dangereuses et à faire prendre les mesures nécessaires pour en faciliter l'élimination. Diverses modalités scientifiques sont à l'étude, ainsi que des propositions concernant un contrôle international du cycle du combustible nucléaire.

Mentionnons également dans ce domaine la *Convention sur la protection physique des matières nucléaires* (CPPMN) et la *Convention internationale sur la répression des actes de terrorisme nucléaire* dont les dispositions sont explicitées par ailleurs.

IV. Contrôles à l'exportation

Tous les engagements récents de la Belgique en matière de non-prolifération supposent une politique rigoureuse en matière de contrôles des exportations. Ceux-ci sont régis notamment par l'article III, § 2 du Traité de non-prolifération, par les dispositions des accords européens en la matière et par les régimes internationaux du Groupe des fournisseurs nucléaires (*Nuclear Suppliers Group* = NSG) et du Comité Zangger (cf. « Un demi-siècle de nucléaire en Belgique », p. 178 et suivantes.). La concertation entre les départements concernés, fédéraux et régionaux, est régie par la loi belge sur les exportations nucléaires du 9 février 1981, la Commission d'avis pour la non-prolifération des armes nucléaires intervenant auprès des Services publics fédéraux de l'économie, puis des Affaires étrangères, en vertu de l'arrêté royal du 19 octobre 1999. En ce qui concerne les exportations de biens et technologies à double usage (nu-

cléaire et non nucléaire), il existe un règlement européen n° 1334/2000, pris par le Conseil le 22/06/2000.

En réponse à une question parlementaire au ministre de l'Économie, de l'énergie et du commerce extérieur, le titulaire de ces trois départements a indiqué qu'en 2003 et 2004, les services compétents avaient traité respectivement 80 et 36 dossiers relatifs à l'exportation de biens nucléaires, d'équipements et de technologie nucléaire et de biens à double usage (cf. Sénat, Questions et réponses, Bulletin 3-49, session 2004-2005, question n° 3-2761).

L'attention du public et du monde politique belge a été attirée en 1999/2000 par le problème posé par la commande passée par l'Autorité pakistanaise pour l'énergie nucléaire auprès de la société Alsthom (Belgique), pour des instruments de mesure et de contrôle destinés à l'équipement de sécurité de la Centrale nucléaire de KANUPP, proche de Karachi. Après de vives discussions, le gouvernement décida de conditionner l'octroi de la licence à l'application par le Pakistan des « *full scope safeguards* », ce qui aurait supposé l'adhésion d'Islamabad au TNP, politiquement impensable dans le contexte politique donné.

L'AIEA avait demandé à la Belgique de prendre en considération le problème de sécurité des populations voisines (priorité reconnue par le NSG comme justifiant des exceptions) et le fait que le site de KANUPP était placé sous des contraintes de vérification et d'inspection allant au-delà du régime général des garanties. La décision négative du gouvernement belge fut toutefois maintenue.

V. Coopération technique à l'AIEA

L'Agence internationale de l'énergie atomique propose à ses membres des programmes de coopération dans divers domaines comportant l'usage de technologies nucléaires à usage civil, notamment en matière médicale, phytosanitaire, agronomique, etc. Cette coopération est offerte aux pays en voie de développement comme une contre-partie à leur adhésion au TNP et à leur renonciation à développer des technologies nucléaires sensibles. Cette compensation relève de la logique même du TNP, qui est basé sur « l'inégalité volontairement assumée » par certains états membres. Une contribution volontaire est demandée principalement aux pays développés sous forme « d'objectif à remplir » dans le cadre du programme de coopération technique. Cette contribution devient en fait obligatoire dès le moment où la Conférence générale a approuvé ce budget de coopération. Toutefois, certains états, dont la Belgique, ne contribuent pas toujours aux programmes à hauteur des objectifs qui leur sont assignés.

Pourtant, notre pays avait développé au cours des années 1990 des programmes spécifiques de coopération, intégrés dans les objectifs de l'Agence, fort appréciés par les bénéficiaires, comme celui concernant l'éradication de la mouche Tsé-Tsé à Zanzibar par la technique de stérilisation par irradiation de l'insecte mâle. Au cours des dernières années la Belgique a abandonné les contributions par programmes et se contente d'alimenter le budget de coopération de l'AIEA par une contribution, généralement inférieure de quelque 30 % aux objectifs qui lui sont fixés.

VI. Présence belge à l'AIEA

La qualité et l'importance de la participation d'un pays à une organisation internationale se mesurent à divers paramètres : contribution financière, assiduité aux réunions des organes électifs, niveau de la participation, qualité des propositions et suivi des questions traitées, mais aussi par la présence, le nombre et la qualité des fonctionnaires et experts de ce pays au sein du cadre international. La Belgique a continué de fournir à l'AIEA des collaborateurs de haut niveau scientifique et technique. Il convient de noter particulièrement la présence de 1999 à 2005 du Dr Pierre Goldschmidt dans les fonctions de directeur général adjoint, responsable du département des Garanties, l'une des plus hautes fonctions de l'Agence et le poste le plus important occupé jusqu'ici par un belge au sein de cette organisation.

Il est à noter par ailleurs que la Belgique siège régulièrement au Conseil des gouverneurs (en alternance avec ses partenaires du Benelux) et y joue son rôle en tant que pays ayant une activité importante en matière de production d'énergie nucléaire et de recherche technologique non militaire.

Le protocole additionnel

Mireille CLAEYS et Pierre GOLDSCHMIDT

Chef du service Non-prolifération et Protection physique
Agence fédérale de contrôle nucléaire (AFCN/FANC)
Ancien directeur général adjoint de l'AIEA

I. Introduction

Aux termes de l'article III du Traité de non-prolifération des armes nucléaires (TNP), tous les États non-dotés d'armes nucléaires (ENDANs ou États) ont l'obligation de soumettre toutes leurs installations et matières nucléaires aux contrôles de garanties de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). Cette obligation ne s'applique pas aux états dotés d'armes nucléaires qui ne soumettent aux inspections de l'Agence, sur une base volontaire, que certaines de leurs installations.

L'article III du TNP constitue donc la base légale de l'accord, signé le 5 avril 1973, entre le royaume de Belgique, le royaume du Danemark, la République fédérale d'Allemagne, l'Irlande, la République italienne, le Grand Duché de Luxembourg, le royaume des Pays-Bas, la Communauté européenne de l'énergie atomique et l'Agence internationale de l'énergie atomique en application des paragraphes 1 à 4 de l'article III du Traité sur la non-prolifération des armes nucléaires, approuvé par la loi du 14 mars 1975 et publié au Moniteur belge du 20 novembre 1975.

Le système des garanties de l'AIEA mis en place en application de l'article III du TNP, a pour fondement la comptabilité des matières nucléaires déclarées, comme c'est également le cas pour le système de contrôle de sécurité d'Euratom (Traité instituant la Communauté européenne de l'énergie atomique, Chapitre VII : « Le contrôle de sécurité »).

Les inspecteurs de l'Agence vérifient en conséquence, lorsqu'ils se rendent dans une installation contenant des matières nucléaires, qu'aucune partie de celles-ci n'a pas été détournée vers une fin non déclarée. Ce système a donné pleine satisfaction pendant plus de vingt ans.

Toutefois en 1991, après la première guerre du Golf, le monde découvrait qu'un État comme l'Irak pouvait développer un programme nucléaire militaire clandestin, totalement séparé de son programme civil déclaré à l'AIEA sans que cette dernière soit en mesure d'en détecter l'existence dans le cadre des accords de garanties généralisées.

II. Genèse du protocole additionnel

La découverte du programme nucléaire militaire irakien a fait prendre conscience aux États membres de l'AIEA de la nécessité pour l'Agence de pouvoir vérifier non seulement que les déclarations des ENDANs sont correctes mais aussi qu'elles sont complètes. Cet objectif a conduit, dès le début de 1992, à un certain nombre de décisions par lesquelles le Conseil des gouverneurs de l'AIEA témoignait de sa volonté de renforcer le système de garanties de l'Agence. Trois axes d'action furent ainsi progressivement définis :

Améliorer l'efficacité et l'efficience des garanties existantes par le biais notamment : d'une déclaration de comptabilité matières élargie, d'échantillonnages environnementaux, du recours à du matériel de surveillance plus performant. En outre, il était demandé à tous les ENDANs de déclarer à l'Agence la construction de toute installation nucléaire dès la prise de décision et non plus seulement six mois avant l'introduction de matières nucléaires dans cette installation.

- Recourir plus fréquemment aux inspections inopinées (inspections dans les installations nucléaires effectuées avec faible préavis).
- Doter l'Agence de la capacité de détecter des activités nucléaires non déclarées.

La détection des activités clandestines va bien au-delà des contrôles traditionnels de l'Agence. Pour réaliser cet objectif, l'Agence devait donc pouvoir :

- Demander aux États de lui fournir des informations complémentaires sur leurs activités nucléaires, y compris sur les études de recherche et développement relatives au cycle du combustible nucléaire n'impliquant pas de matières nucléaires ainsi que sur leurs exportations et importations d'équipements et de matières non nucléaires intervenant dans le cycle du combustible.
- Permettre à ses inspecteurs de procéder à des accès complémentaires dans les installations ou en dehors de celles-ci avec un préavis variant selon les circonstances entre 2 et 24 heures, afin
  - de vérifier l'absence d'activités et de matières nucléaires non déclarées ;

- de résoudre une question relative à l'exactitude et l'exhaustivité des renseignements communiqués ;
- de vérifier la déclaration de déclassement d'une installation ayant contenu des matières nucléaires.

- Augmenter le nombre d'inspecteurs désignés pour effectuer les vérifications et obliger les États à leur délivrer des visas à entrées multiples d'une durée minimale d'un an.

Cette nouvelle conception des contrôles de garanties nécessitait un instrument juridique nouveau qui devait compléter l'accord de garanties liant un état à l'Agence.

À l'origine, le secrétariat de l'Agence avait basé toute son approche du protocole additionnel sur le postulat que celui-ci ne concernait que les seuls États ayant conclu avec l'Agence un accord de garanties généralisées (c'est-à-dire les États non dotés d'armes nucléaires, parties au Traité de non-prolifération des armes nucléaires qui de ce fait, se sont engagés à soumettre, aux contrôles de l'Agence, l'ensemble de leurs installations nucléaires). Les États dotés de l'arme nucléaire ainsi que les États non parties au TNP (Inde, Israël, Cuba – qui ne devait adhérer au TNP qu'en 2002 –, Pakistan) dont seulement quelques installations sont contrôlées, échappaient quant à eux, au champ d'application du protocole additionnel.

Nombre d'États non dotés dont la Belgique voyaient dans cette orientation une aggravation du déséquilibre déjà existant en matière de non-prolifération nucléaire entre les états dotés d'armes nucléaires et les autres. De plus, ils estimaient que si l'objectif était bien de doter l'Agence de la capacité de détecter les matières et activités nucléaires non déclarées, il était illogique de limiter d'emblée le protocole additionnel aux États qui possédaient déjà un accord de garanties généralisées.

En effet :

- la finalité du protocole additionnel étant le renforcement de la prévention de la prolifération des armes nucléaires, il aurait été paradoxal de laisser délibérément en dehors du processus des États qui n'offrent que peu de garantie en termes de non-prolifération nucléaire ;
- le risque d'activités non déclarées n'épargne aucun État ;
- la mise en œuvre du protocole était perçue comme une charge supplémentaire pour l'État, pour les opérateurs ainsi que pour les milieux industriels et scientifiques concernés[1].

---

[1] Le surcoût qu'entraîne la mise en œuvre du protocole additionnel est temporaire. Actuellement, il est en effet entendu que lorsque l'Agence a conclu à l'absence de matières et d'activités non déclarées dans un État ayant ratifié le Protocole additionnel, elle applique dans cet État des « garanties intégrées ». Celles-ci représentent la combi-

Plaider l'universalité du protocole additionnel ne fut pas chose aisée mais finalement, il fut admis que le directeur général de l'AIEA pourrait négocier :

- avec les États dotés de l'arme nucléaire des protocoles additionnels ou d'autres accords juridiquement contraignants contenant celles des mesures prévues dans le modèle de Protocole dont chaque État doté d'armes nucléaires juge qu'elles peuvent contribuer aux objectifs de non-prolifération et d'efficience du Protocole si elles sont appliquées à l'égard de cet État et qu'elles sont compatibles avec les obligations qui incombent au dit État en vertu de l'article I du TNP ;
- avec d'autres États qui sont prêts à accepter des mesures prévues dans le modèle de Protocole en vue d'atteindre les objectifs d'efficacité et d'efficience des garanties.

C'est ainsi qu'après plus de 5 années de négociation, fut approuvé le 15 mai 1997, par le Conseil des gouverneurs de l'Agence, le texte du modèle de Protocole additionnel (PA) aux accords de garanties (AG). À partir de ce moment, tout protocole additionnel conclu était sensé renforcer les capacités de l'Agence à détecter les matières et activités nucléaires non déclarées.

III. Les protocoles additionnels dans l'Union européenne

Le modèle de protocole adopté, commençait pour l'Union européenne un nouveau round de négociations en vue de rédiger le texte du protocole additionnel des 13 états membres non dotés d'armes nucléaires. L'enjeu principal était de déterminer le rôle de la Commission Euratom dans la mise en œuvre du protocole. S'il était aisé de le définir pour les dispositions relatives aux matières ou aux sites nucléaires (compétence exclusive de la Commission ou compétence mixte en vertu du Traité Euratom), il n'en allait pas de même pour les autres dispositions. En effet, deux courants existaient au sein de l'Union : les États prêts à confier à la Commission la mise en œuvre de l'ensemble des dispositions du protocole tout en restant évidemment juridiquement responsables devant l'AIEA de leur bonne exécution (Allemagne, Belgique, Espagne, Grand Duché de Luxembourg, Grèce, Italie, Pays-Bas et Portugal) et les États qui entendaient remplir certaines de leurs obligations (autres que celles relatives aux inspections et à la comptabilité des matières nucléaires) sans passer par la Commission (Autriche, Danemark, Finlande, Irlande, Suède). La France et le Royaume-Uni, bien que peu concernés par cette question, prenaient fait et cause pour le camp des opposants à la délégation de la

---

naison optimale (et non la simple superposition) des mesures de vérifications prévues dans les AG et le PA, en vue d'une efficacité maximale au moindre coût.

mise en œuvre des obligations du Protocole additionnel à Euratom, restant en cela fidèles à leur position politique traditionnelle. Dans le camp des partisans de la Commission se retrouvaient tous les États membres qui traditionnellement défendent les pouvoirs de la Commission. Néanmoins dans ce cas, la motivation essentielle de leur prise de position était l'absence de système national de contrôle garanties soit parce qu'ils étaient membres fondateurs de la Communauté européenne de l'énergie atomique (CEEA) et que, dès lors, ils avaient estimé inutile de se doter de cette capacité soit parce qu'ils avaient démantelé la leur – parfois d'ailleurs, après de graves difficultés internes – au moment de leur adhésion à l'Europe. Tous craignaient de ne pas pouvoir, faute d'effectifs suffisants, faire face aux demandes de l'AIEA.

Après de longues discussions qui n'aboutirent qu'à consolider le clivage, une solution put être trouvée sur la base d'une proposition conjointe de la présidence luxembourgeoise et de la Belgique qui, en substance, disposait que chaque état membre qui le souhaitait pouvait déléguer l'exécution des mesures du protocole à la Commission à condition d'en informer celle-ci et le directeur général de l'AIEA et de préciser également, le cas échéant, quelles sont les mesures qu'il exécuterait directement.

Bien que toute cette saga ait conduit à une proposition de protocole juridiquement et administrativement complexe, la négociation de son texte avec l'AIEA se déroula assez facilement. Parallèlement, à ces discussions, la France et le Royaume-Uni négocièrent leur protocole additionnel.

Le 22 septembre 1998, les treize États non dotés d'armes nucléaires membres de la CEEA, EURATOM et l'AIEA signèrent le protocole additionnel à l'accord de garanties de 1975. Au même moment, la France et le Royaume-Uni signèrent également le protocole additionnel à leur accord de garanties.

IV. Entrée en vigueur du protocole additionnel en Belgique

Le protocole additionnel est entré en vigueur sur le territoire de l'Union européenne le 30 avril 2004 soit la veille de l'élargissement de l'Union européenne à dix nouveaux états. La Commission avait exercé une forte pression sur les États membres de l'époque pour que ceux-ci le ratifient et soient en mesure de le mettre en œuvre avant le 1er mai 2004 car ainsi le protocole additionnel entrait dans l'acquis communautaire ce qui permettait son entrée en vigueur dans l'Union européenne sans attendre sa ratification par tous les nouveaux états membres, qui ne l'avaient pas encore fait. Si cela n'avait pas été fait, l'article 102 du Traité Euratom aurait été d'application avec pour conséquence de retarder très sensible-

ment la mise en œuvre du protocole dans les États membres (puisque cet article prévoit notamment que tout accord conclu avec une organisation internationale et auquel sont parties outre la Communauté, un ou plusieurs états membres ne peut entrer en vigueur que lorsqu'il est devenu applicable dans tous les états membres intéressés conformément à leur droit interne respectif, voir la section « Convention sur la protection physique des matières nucléaires »).

Si notre Parlement avait déjà approuvé le protocole additionnel en 2002 (loi du 13 novembre 2002 portant approbation du Protocole additionnel), il n'en demeurait pas moins que la Belgique n'était juridiquement pas prête à l'entrée en vigueur du protocole additionnel à la date butoir du 30 avril 2004.

En effet, le champ d'application du protocole dépassant largement celui de notre accord de garanties, une nouvelle loi était nécessaire. Pour quantité de raisons, le processus législatif connut retard après retard, si bien qu'afin de ne pas bloquer l'entrée en vigueur du protocole dans l'Union, les responsables politiques de l'époque prirent la décision d'en appliquer les mesures sans avoir la base légale requise. Ce n'est que le 1er juin 2005 que la loi d'application du protocole additionnel fut promulguée.

La Convention sur la protection physique des matières nucléaires

Mireille CLAEYS

Chef du service Non-prolifération et Protection physique
Agence fédérale de contrôle nucléaire (AFCN/FANC)

I. Introduction

La Convention sur la Protection physique des matières nucléaires (CPPMN) a été ouverte à la signature des États le 3 mars 1980 et signée par la Belgique le 13 juin 1980, de concert avec ses partenaires d'Euratom et la Commission des communautés européennes agissant en tant que telle pour les compétences qui lui sont propres Elle est entrée en vigueur le 8 février 1987.

La CPPMN a été adoptée par le Parlement belge le 24 juillet 1984 et elle est entrée en vigueur, en Belgique, le 6 octobre 1991. Ce décalage important entre la loi d'assentiment et l'entrée en vigueur de la Convention est imputable à la procédure prévue par l'article 102 du Traité Euratom (cet article prévoit notamment que tout accord conclu avec une organisation internationale et auquel sont partie outre la Communauté, un ou plusieurs états membres ne peut entrer en vigueur que lorsqu'il est devenu applicable dans tous les états membres intéressés conformément à leur droit interne respectif, voir la section « Le protocole additionnel »).

La négociation de la Convention à peine terminée, les USA et quelques autres États tels que par exemple, l'Autriche, l'Australie, le Canada se répandirent auprès de qui voulait les entendre sur le caractère incomplet de la CPPMN et n'eurent de cesse, après 1987, que de faire procéder à sa révision malgré l'opposition très claire d'une majorité des états parties. Il est vrai que de nombreux négociateurs de la Convention – dont la Belgique – avaient, à l'époque, estimé que seuls les risques d'actes malveillants dirigés contre des matières nucléaires en cours de transport international justifiaient une Convention internationale puisque la protec-

tion physique des matières nucléaires sur le territoire d'un état relève exclusivement de la souveraineté nationale de cet état.

C'est la raison pour laquelle, la CPPMN ne s'applique qu'à la protection physique des transports internationaux de matières nucléaires. Toutefois ses dispositions pénales et celles relatives à la coopération judiciaire sont également applicables aux matières nucléaires en cours d'utilisation, d'entreposage ou de transport domestique.

II. Révision de la CPPMN

Les USA ont toujours été vivement préoccupés par l'éventualité d'une attaque terroriste contre des matières ou installations nucléaires et ce, bien avant les attentats du 11 septembre 2001.

À New York, les négociations de la Convention des Nations unies sur le terrorisme nucléaire étaient, à la fin des années 1990, complètement enlisées, la CPPMN constituait, dès lors, le seul cadre juridique utilisable pour lutter contre ce type de terrorisme. Il convenait, en conséquence, de renforcer la CPPMN en élargissant son champ d'application aux matières nucléaires en cours d'utilisation, d'entreposage ou de transport domestique ainsi qu'aux installations nucléaires d'une part et d'autre part, d'y insérer des dispositions relatives au terrorisme nucléaire en criminalisant notamment la contrebande de matières nucléaires, le sabotage d'installations nucléaires ou encore la création d'associations de malfaiteurs afin de commettre des actes de malveillance dirigés contre les matières et les installations nucléaires.

À l'issue d'un round d'intenses démarches diplomatiques américaines auprès des États parties à la CPPMN, le directeur général de l'AIEA – dépositaire de la Convention – décida, en juin 2000, de mettre en place un groupe d'experts chargé d'examiner si la convention devait ou non être revue. Après un an de discussion, les experts n'avaient toujours pas pu dégager un consensus en faveur de la révision.

C'est alors, que les USA, soutenus par le Canada, proposèrent la procédure suivante : tout d'abord, un groupe à composition non limitée d'experts techniques et juridiques serait créé par le directeur général de l'AIEA afin de rédiger un amendement bien défini à la convention. Ensuite, sur la base de cet amendement, les États parties décideraient si la convention devait ou non être revue. Dans l'affirmative enfin, une conférence des États parties devrait être organisée conformément à l'article 20 de la CPPMN.

Cette proposition américaine était strictement imparable car, dans le cadre de la diplomatie multilatérale, il est difficilement concevable de refuser une négociation.

En conséquence, en acceptant de recourir à cette procédure, tous les états présents savaient qu'ils s'engageaient, de facto, inéluctablement dans un processus de révision de la Convention. L'occurrence des attentats du 11 septembre 2001 réduisit à néant les espoirs déjà ténus de ceux qui croyaient encore en l'immuabilité de la CPPMN.

Après six réunions auxquelles la Belgique a participé, le groupe a adopté, par consensus, en mars 2003, un rapport proposant un projet d'amendement.

Le projet portait sur l'extension du champ d'application de la Convention aux matières nucléaires en cours d'utilisation, d'entreposage et de transport sur le territoire national ainsi que sur l'inclusion dans la liste des infractions déjà prévues de la contrebande de matières nucléaires, du sabotage d'installations nucléaires et de la création d'associations de malfaiteurs afin de commettre des actes de malveillance dirigés contre les matières et les installations nucléaires. Il permettait une coopération élargie entre les états en vue de la mise en œuvre rapide de mesures pour la localisation et la récupération de matières nucléaires volées ou introduites en fraude dans un état. Pour l'atténuation des conséquences radiologiques d'actes de sabotage dirigés contre des installations nucléaires et enfin pour la prévention du sabotage. Il introduisait dans la CPPMN les douze principes fondamentaux de la protection physique (responsabilité de l'État, responsabilités successives pendant un transport international, cadre législatif et réglementaire, autorité compétente, responsabilité des détenteurs d'agréments, culture de sécurité, menace, approche graduée, défense en profondeur, assurance de qualité, plans d'urgence, confidentialité). Enfin, il actualisait les dispositions de la Convention relatives à l'extradition.

Pendant la négociation de cet amendement, la délégation belge s'intéressa tout particulièrement à la définition des obligations des États parties et à celle de l'infraction de sabotage.

De nombreuses délégations recommandaient que les douze principes fondamentaux ci-dessus constituent les obligations incombant aux états au titre de la Convention. La Belgique, comme d'autres, ne pouvait accepter cette approche car les principes ne sont pas applicables en tant que tels mais doivent servir de lignes directrices pour l'élaboration des réglementations nationales. Les travaux du groupe d'experts s'enlisaient dans d'interminables discussions entre les deux blocs, c'est alors que la délégation belge prit l'initiative d'introduire une proposition de texte. Ce texte, après avoir rappelé les objectifs d'un système de protection physique, obligeait les États à instituer une autorité compétente, à élaborer un cadre législatif et réglementaire, à prendre les mesures requises pour réaliser les objectifs de la protection physique. Enfin, le texte précisait que pour l'exécution de ces obligations, l'État devait s'inspirer (*shall be guided by*)

des principes fondamentaux. Au grand dam des défenseurs du dogme : principe fondamental = obligation, la proposition belge appuyée immédiatement par les USA – qui voyaient en elle un moyen de sortir du marasme ambiant – fut soutenue par la majorité des délégations. Néanmoins, les « dogmatiques » parmi lesquels l'Allemagne et la France n'avaient pas dit leur dernier mot et profitant d'une réunion du G8 à Paris, l'Allemagne et la France firent pression, avec succès, sur leurs partenaires pour que le paragraphe de notre proposition relatif aux principes fondamentaux soit modifié afin d'imposer aux états parties d'appliquer pour autant qu'il soit raisonnable et faisable, les principes fondamentaux. Cette prise de position du G8 a bien sûr amené la quasi-totalité des délégations à, très courageusement, changer d'avis ! Le droit international n'est pas sorti grandi de l'aventure mais pour la délégation belge, l'essentiel était sauvé puisque le texte précisait clairement les obligations des États parties et que les principes fondamentaux même s'ils devaient être appliqués – avec les réserves précitées – n'étaient finalement qu'un outil permettant aux États de s'en acquitter.

La définition de l'infraction de sabotage a été l'occasion d'un débat long et agité.

Elle devait, en effet, intégrer les trois éléments constitutifs suivants :

- l'acte doit porter une atteinte physique à l'installation et non pas seulement perturber son exploitation ;
- l'acte doit être susceptible de provoquer la mort ou des blessures graves, ou des dommages considérables à l'environnement ;
- le texte doit refléter la spécificité du sabotage nucléaire (exposition à des rayonnements ou relâchement de substances radioactives, etc.) sous peine de tomber dans le droit commun.

Une difficulté importante de la recherche de la définition fut la prise en compte de l'intentionnalité de l'auteur.

La première définition proposée n'était pas satisfaisante, faute d'exonérer de responsabilité le membre des services de secours dont l'action aurait provoqué un rejet de substances radioactives alors qu'il évitait simplement un dommage plus grand et n'avait aucune intention malveillante. Les USA ont alors proposé un texte qui rencontrait ce cas de figure mais la proposition américaine ne réglait pas tout : par exemple, risquait de tomber sous le coup de la Convention, le membre du personnel de l'installation qui, dans le cadre de son activité, posait régulièrement un acte déterminé et qui, un jour, soit par erreur soit par sa faute (par ex. : en raison de son état d'ébriété) provoquait, en ce faisant, un rejet mais sans intention de causer un dommage.

La double intentionnalité (commettre intentionnellement un acte dans le but de causer des dommages) était à l'évidence nécessaire même si les

USA et d'autres (Allemagne, Autriche, Canada, etc.) y étaient opposés au départ. La Belgique a alors déposé une proposition de texte inspirée de la Convention de 1997 pour la suppression des attentats terroristes et aux termes de laquelle le sabotage est défini comme étant l'acte *intentionnel* dirigé contre des matières ou des installations nucléaires qui provoque ou risque de provoquer des rejets radioactifs *avec le but* de causer la mort ou de graves dommages corporels ou, *avec le but* de causer des dommages substantiels à la propriété ou à l'environnement ou, *avec le but* d'obliger une personne physique ou morale à faire ou ne pas faire un acte déterminé. Cette proposition ne reçut qu'un accueil mitigé et seul le Mexique l'appuya sans réserve. Certaines délégations estimaient, en effet excessif, qu'un juge soit à la fois obligé d'apporter la preuve de l'intentionnalité de l'acte et des objectifs poursuivis. Néanmoins, ni le Mexique ni la Belgique ne céda et la délégation américaine, comprenant sans doute qu'il s'agissait là d'une question essentielle accepta de négocier, sous la houlette de la Chine, une nouvelle définition de l'infraction de sabotage, par ailleurs, très largement inspirée de la proposition belge initiale et où était repris le principe de la double intentionnalité.

III. La Conférence d'amendement

Lors de la Conférence générale de l'AIEA en septembre 2003, l'Autriche a annoncé son intention de lancer la procédure d'amendement conformément à l'article 20 de la CPPMN. La proposition d'amendement autrichienne était basée sur le document final du groupe d'experts techniques et juridiques. Pour pouvoir convoquer la Conférence d'amendement, il fallait, à présent, attendre qu'au moins deux tiers des États parties acceptent le principe de l'amendement.

En avril 2004, la Belgique a fait savoir, par note verbale adressée au Ministère des affaires étrangères autrichien, qu'elle soutenait le principe de la convocation d'une conférence pour examiner la proposition d'amendement à la lumière du rapport final du groupe d'experts techniques et juridiques. Elle a toutefois précisé qu'elle ne pouvait souscrire à la proposition autrichienne car certains points lui posaient encore problème ou devaient encore faire l'objet d'un examen plus approfondi.

En janvier 2005, le directeur général de l'AIEA est finalement parvenu à atteindre la majorité nécessaire à la convocation de la conférence d'amendement chargée d'examiner et d'adopter le projet d'amendement à la CPPMN. La Conférence d'amendement s'est réunie du 4 au 8 juillet 2005.

Enfin, le 8 juillet 2005, quatre-vingt neuf des cent douze États parties ont adopté, à Vienne, le texte d'amendement à la CPPMN.

La proposition d'amendement adoptée a été communiquée par le dépositaire à tous les États parties et à la Commission. Elle doit à présent être soumise à la ratification, à l'acceptation ou à l'approbation des États parties. Elle entrera en vigueur, conformément au §2 de l'article 20 de la Convention, après que deux tiers des États parties l'auront ratifiée. Actuellement, seuls quatre États l'ont ratifié.

Code de conduite sur la sûreté et la sécurité des sources radioactives, orientations pour l'importation et l'exportation de sources radioactives

Mireille CLAEYS

Chef du service Non-prolifération et Protection physique
Agence fédérale de contrôle nucléaire (AFCN/FANC)

Le Code de conduite sur la sûreté et la sécurité des sources radioactives est né de la révision du Code de conduite sur la sûreté des sources radioactives.

Les attentats du 11 septembre 2001 ont accru considérablement les craintes de la Communauté internationale de voir se développer des actes de terrorisme nucléaire ou radiologique. Au lendemain des attentats de 2001, l'AIEA a élaboré un programme d'action pour la lutte contre le terrorisme nucléaire. Parmi les mesures envisagées figurait le renforcement de la sécurité des sources radioactives. Le programme d'action de l'Agence ayant été adopté par le Conseil des gouverneurs en mars 2002, le travail de révision du Code de conduite sur la sûreté des sources radioactives pouvait commencer, l'objectif étant de le compléter par une série de dispositions relatives à la sécurité des sources. Un groupe de travail fut institué et les négociations commencèrent en août 2002. Malheureusement, beaucoup d'États ne jugèrent pas utile d'y participer ou en occultèrent complètement les aspects politiques ou juridiques, en ne déléguant à Vienne que des experts techniques qui le plus souvent n'ont perçu ni les enjeux réels ni les conséquences du processus tant pour les pays industrialisés que pour le Tiers Monde. Il fut donc facile à d'aucuns de laisser libre cours à leurs dérives sécuritaires même si celles-ci étaient incompatibles avec les besoins de nombreux pays dans des domaines où les sources radioactives occupent une place significative comme la santé, l'agriculture, la recherche ou encore le développement industriel.

Afin de sensibiliser encore davantage si besoin en était, les États à la menace du terrorisme radiologique, l'AIEA a organisé en mars 2003 à

Vienne une Conférence internationale sur la sécurité des sources radioactives.

Enfin, dans la foulée du Sommet de Kananaskis (où fut lancé un Partenariat mondial pour empêcher les terroristes ou ceux qui leur donnent asile d'avoir accès à des armes et matières de destruction massive), le G8 décida, au Sommet d'Evian de 2003, d'adopter des normes rigoureuses afin d'empêcher que les sources radioactives ne puissent être acquises par des terroristes dans le but de fabriquer des bombes sales. À cette fin, le G8 s'engagea à soutenir les éléments du projet de code de conduite révisé de l'Agence qui, à son estime, étaient les plus aptes à prévenir le terrorisme radiologique. Sept éléments furent ainsi retenus :

- les registres nationaux permettant de localiser les sources.
- les programmes de récupération des sources orphelines.
- les réglementations nationales limitant les exportations de sources à haut risque aux États qui disposent de systèmes efficaces de contrôle.
- les exigences de notification aux États importateurs.
- les mesures prises au niveau national pour faire en sorte que le vol ou l'utilisation non conforme des sources radioactives soient passibles de sanctions pénales.
- les mesures de protection physique et de contrôle des accès aux lieux enfermant des sources radioactives.
- les lois adoptées par chaque pays afin de garantir l'élimination des sources épuisées scellées à haut risque dans des conditions optimales de sûreté et de sécurité.

Le G8 prit également au Sommet d'Evian l'engagement d'aboutir, avant son Sommet de 2004, à un accord sur les recommandations de l'AIEA.

Les grands de ce monde ayant parlé, les négociations de Vienne ne furent plus qu'une formalité, les méchantes langues diraient un simulacre, tant il est vrai que la moindre proposition d'amendement était considérée comme hérétique par le Secrétariat ou par les membres du G8, certains d'entre eux n'hésitant pas d'ailleurs à recourir aux pressions diplomatiques dans les capitales pour calmer les ardeurs des délégations les plus récalcitrantes.

Dans ces conditions, il fut aisé de forcer le consensus et il ne fallut pas attendre 2004 pour avoir un code de conduite sur la sûreté et la sécurité des sources radioactives. Le texte était prêt fin juillet 2003 et fut soumis, dès le mois de septembre, à la Conférence générale de l'AIEA qui l'approuva. La Conférence bien que reconnaissant le caractère juridiquement non contraignant du code, engageait instamment les États à écrire au directeur général de l'Agence pour lui signaler qu'ils soutenaient pleine-

ment les efforts de l'Agence pour renforcer la sûreté et la sécurité des sources radioactives et œuvraient en vue de l'application des orientations énoncées dans le code de conduite.

En s'adressant au directeur général, les États s'engageaient donc politiquement à renforcer, grâce à une législation et à une réglementation appropriées, la sûreté et la sécurité des sources en instituant des contrôles efficaces et en les protégeant du vol, de la perte ou de toute utilisation illicite. Un an plus tard, en 2004, la Conférence générale adopta un set d'orientations complémentaires pour l'exportation et l'importation de sources radioactives, le statut de ces orientations est identique à celui du Code de conduite.

En mars 2004, le ministre des Affaires étrangères de l'époque, Monsieur Louis Michel, adressa une lettre au directeur général de l'AIEA dans laquelle, on pouvait lire « *I am pleased to inform you that Belgium is working toward following the guidance contained in the code of conduct. In this perspective, we are currently examining all aspects of this guidance in order to improve, to the extent necessary, our national legislation in accordance with relevant commitments and standards, or multilateral arrangements* ».

Fin juin 2006, 83 États s'étaient engagés politiquement à mettre en œuvre les orientations du Code de conduite. Les orientations relatives aux exportations et aux importations de sources engendrent encore une plus grande méfiance car peu d'États y ont formellement souscrit à ce jour.

La Convention internationale pour la répression des actes de terrorisme nucléaire

Mireille CLAEYS

Chef du service Non-prolifération et Protection physique
Agence fédérale de contrôle nucléaire (AFCN/FANC)

La Convention internationale pour la répression des actes de terrorisme nucléaire a été adoptée par l'Assemblée générale des Nations unies le 13 avril 2005.

Elle détaille les infractions liées à la détention et à l'utilisation illicites et intentionnelles de matières radioactives ou d'un engin radioactif ainsi qu'à l'utilisation illicite ou à l'endommagement d'une installation nucléaire.

Les États parties s'obligent à rendre punissables, dans leur droit interne, ces infractions et à leur appliquer des sanctions à la mesure de leur gravité.

De même, les États parties s'obligent à adopter des mesures appropriées pour assurer la protection des matières radioactives, en tenant compte des recommandations de l'Agence internationale de l'énergie atomique applicables en la matière.

La Convention a été ouverte à la signature des États, le 14 septembre 2005. Les États membres de l'Union européenne l'ont signée le jour même.

En Belgique, la procédure législative tendant à l'adoption de la loi d'assentiment de la Convention par notre Parlement est en cours. Pour permettre à la Convention sur le terrorisme nucléaire d'être mise en œuvre en Belgique, une révision de notre Code pénal sera, en outre, nécessaire.

L'objectif global de la Convention est la prévention et la répression des actes de terrorisme nucléaire mais aussi, pourrions-nous ajouter, radiologique. Le souci de lutter contre tout acte qui pourrait aboutir à la

fabrication d'une bombe sale est, en effet, omniprésent dans le texte et il est, par ailleurs, regrettable que le titre de la Convention ne reflète pas davantage cette réalité.

En raison des objectifs poursuivis, la Convention sur le terrorisme nucléaire est une étape importante en matière de sécurité nucléaire. En effet, pour la première fois, un instrument international juridiquement contraignant traite de la protection physique des matières radioactives et des actes malveillants dont elles pourraient être la cible ou l'instrument. Son champ d'application est donc infiniment plus large que celui de la CPPMN même révisée puisqu'il ne concerne quant à lui, que les matières et installations nucléaires.

À ce jour, il n'existe aucune recommandation de l'AIEA portant sur la protection physique des matières radioactives autres que les matières nucléaires. Compte tenu de l'ampleur et de la complexité du problème, il est très vraisemblable que l'élaboration de nouvelles recommandations prendra plusieurs années.

La résolution 1540 du Conseil de sécurité des Nations unies

Mireille CLAEYS

Chef du service Non-prolifération et Protection physique
Agence fédérale de contrôle nucléaire (AFCN/FANC)

La résolution 1540 (2004) du Conseil de Sécurité des Nations unies a pour objectif d'empêcher la prolifération des armes de destruction massive qu'elles soient nucléaires, chimiques ou biologiques, de leurs vecteurs et des matières connexes ainsi que de dissuader les acteurs non étatiques de se procurer de telles armes ou de se livrer à leur trafic illicite.

Aux termes de la résolution, les États ont l'obligation d'adopter et d'appliquer une législation appropriée et efficace interdisant à tout acteur non étatique (notamment les groupes terroristes) de fabriquer, de se procurer, de mettre au point, de posséder, de transporter, de transférer ou d'utiliser des armes nucléaires, chimiques ou biologiques ou leurs vecteurs ainsi que de mettre en place des dispositifs intérieurs de contrôle destinés à prévenir la prolifération de ces armes ou de leurs vecteurs ou de leurs composants.

Concrètement, pour la mise en œuvre de cette résolution dans le secteur nucléaire, l'État doit mettre en place diverses mesures de comptabilité des matières nucléaires, des mesures de protection physique, des mesures de contrôle aux frontières, des mesures pour détecter, dissuader, prévenir et combattre le trafic illicite ainsi que des mesures de contrôle des importations et des exportations de matières, biens et équipements nucléaires.

Conformément au paragraphe 4 la résolution, un Comité a été créé, le 28 avril 2004, pour en examiner la mise en œuvre sur la base d'un premier rapport détaillant les mesures prises et / ou envisagées que les États devaient remettre audit Comité pour le 28 octobre 2004.

La Belgique a remis son rapport national dans le courant du mois d'octobre 2004 et, suite à la demande du Comité, elle a fourni un complément d'informations en décembre 2005.

La matrice développée par le Comité montre que la Belgique répond de manière satisfaisante aux obligations de la résolution 1540. Pour le secteur nucléaire, elle possède une législation nationale déjà très complète, à laquelle s'ajoutent les nombreux instruments internationaux dont elle est partie (Convention sur la protection physique des matières nucléaires, Traité de non-prolifération des armes nucléaires, Accord de garanties et Protocole additionnel, Traité Euratom) ainsi que les directives et règlements européens pertinents en matière de non-prolifération. En outre, il est intéressant de noter que la matrice révèle également que nous disposons d'un cadre juridique prévoyant des mesures de surveillance aux stades de la fabrication, de l'utilisation, des stocks et du transport des matières nucléaires et radioactives pouvant contribuer à la prévention de la prolifération nucléaire (arrêté royal du 20 juillet 2001 portant règlement général de la protection de la population, des travailleurs et de l'environnement contre le danger des rayonnements ionisants), ce qui n'est pas le cas pour les secteurs chimique et biologique.

Politique de la Belgique en matière de contrôle des armements nucléaires (hors TNP et AIEA)

Michel ADAM

Ambassadeur honoraire
ancien Représentant permanent de la Belgique auprès de l'AIEA
ancien membre du Conseil des Gouverneurs de l'AIEA

La révision des concepts stratégiques de l'OTAN, consécutive à la fin de la guerre froide, et son prolongement dans le monde politique belge, ne pouvaient manquer d'exercer une influence sur le dispositif militaire belge au sein de l'Alliance, comme sur les positions belges dans les grandes enceintes internationales de négociations sur le contrôle des armements (cf. « *La Belgique et les armes nucléaires* », CRIS, *Courrier Hebdomadaire* n° 1871-1872 /2005 étude détaillée et très intéressante d'André Dumoulin et Quentin Michel).

Déjà au temps de la confrontation Est-Ouest la présence d'armes nucléaires sur le territoire belge, comme d'ailleurs la participation d'unités militaires belges à des missions nucléaires de l'OTAN, avaient été jugées en contradiction avec le TNP par les opposants à la stratégie de dissuasion de l'Alliance Atlantique.

Si en juin 1992 le ministre de la Défense Leo Delcroix pouvait encore répondre à une question parlementaire à ce sujet que « *la participation aux tâches nucléaires de l'Alliance reste un élément-clé de la solidarité entre pays membres de l'OTAN pour garantir la paix en Europe* », la position officielle exprimée le 14 juillet 1999 dans la déclaration gouvernementale de l'équipe Verhofstadt I indiquait simplement que : « *les autorités politiques poursuivront leurs initiatives contribuant au contrôle des armements et au désarmement* ». En fait, la position du Gouvernement belge vis-à-vis de l'Alliance et du partage des responsabilités militaires est restée inchangée quant aux principes, mais entretemps la doctrine militaire de l'Alliance a évolué face aux nouvelles réalités. Par ailleurs un débat juridique et politique réexaminait certains éléments des

relations entre l'Alliance et les États-membres en matière d'armes nucléaires.

L'article II du TNP stipule en effet que les états qui renoncent, comme la Belgique, à se doter d'armes nucléaires s'engagent à ne pas accepter le transfert ou le contrôle d'armes nucléaires ou de dispositifs nucléaires militaires, ni directement ni indirectement. Il avait été admis *ab initio* que le stationnement d'armes sur le territoire d'un état de l'Alliance par les États-Unis, qui en conservaient le contrôle opérationnel, ne constituait *pas* une infraction à cet engagement.

La Cour internationale de Justice rendait le 8 juillet 1996 un avis consultatif – c.à.d. non contraignant – sur la question de la licéité de la possession et de l'usage militaire ou diplomatique (dissuasion) de l'arme nucléaire. Ce document analyse les divers arguments en présence et tout en penchant vers une condamnation de l 'emploi et de la menace d'emploi de l'arme nucléaire, au nom du droit humanitaire, ne tranche pas finalement la question de son caractère licite ou illicite au regard du droit international. Dans une réponse à une question parlementaire, le 8 août 1996, le ministre de la Défense M. Jean-Pol Poncelet estima que l'avis de la Cour n'était pas en contradiction avec la doctrine de l'OTAN « ...*et ne remet donc pas en question la politique de la sécurité que la Belgique mène en conformité avec les décisions de l'Alliance dont elle est membre* ». Ce qui en clair signifiait l'absence de remise en question par le gouvernement de la possibilité du stationnement en territoire belge d'armes nucléaires.

Or, au sein du Parlement belge, une évolution des esprits était en cours et s'exprimait notamment dans le libellé des résolutions adoptées respectivement par la Chambre et le Sénat le 13 juillet et le 25 avril 2005. Parmi les préoccupations exprimées par les représentants des divers partis on note des inquiétudes communes qui ne peuvent être ramenées à des clivages partisans antérieurs et concernant notamment :

- L'avenir de la non-prolifération, suite à l'acquisition de capacités nucléaires par l'Inde et le Pakistan et aux intentions affichées ou supposées de la Corée du Nord et de l'Iran.
- La crainte d'un relâchement des efforts de désarmement nucléaire après la vague des réductions des potentiels américain et russe à la fin de la guerre froide.
- Les risques nouveaux liés aux menaces de terrorisme nucléaire.
- Les conséquences de l'attitude très négative des États-Unis en matière de nouveaux engagements multilatéraux pouvant entraîner pour Washington des contraintes ou des restrictions à l'usage, au déploiement, ou à la menace d'emploi de ses moyens militaires.

- La nécessité d'une révision des doctrines stratégiques de l'OTAN en matière d'armements nucléaires pouvant impliquer le retrait des armes américaines présentes dans les états européens non dotés d'armes nucléaires au sens du TNP.
- Le souhait de développer la coopération en matière de désarmement au sein de l'Union européenne.
- Le soutien à la ratification et à l'entrée en vigueur du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires, cf. note séparée à ce sujet.
- Le vœu d'une reprise substantielle des travaux de la Conférence du désarmement pour explorer de nouveaux terrains de négociation.

À différentes reprises, par la voix du ministre des Affaires étrangères, le gouvernement belge a indiqué qu'il partage les préoccupations exprimées au parlement et les met au centre de sa politique en matière de désarmement et de contrôle des armements et ce, dans les différents organes auxquels elle participe, avec ses partenaires de l'OTAN et de l'UE.

Malheureusement, le contexte international ne s 'est guère prêté à une relance en ce domaine au cours des premières années du 21e siècle. Les années 1990 avaient été marquées par le succès de la négociation du Traité sur l'interdiction complète des essais nucléaires (dont il est question ci-après). Force fut de constater par après que la phase dynamique en matière d'initiatives de désarmement et de contrôle des armements, qui avait suivi la fin de la guerre froide était épuisée. Au sein de la *Conférence du désarmement* on parait ignorer la phrase écrite au 21e siècle par un juriste de Salamanque, gravée sur l'une des portes de bronze de la salle du Conseil du Palais des Nations où se déroulent les sessions : « *Ce sont les barbares qui s'en remettent à la supériorité des armes pour déterminer le droit d'exercer le pouvoir* ».

En effet, il ne parait pas actuellement possible de réunir un consensus sur un programme de travail. Depuis plusieurs années déjà, la seule proposition sur la table des négociateurs est celle dite « des cinq ambassadeurs », (Belgique, Suède, Algérie, Chili, Colombie) constituant un groupe informel atypique qui mène au sein de la Conférence une action volontariste, visant à la maintenir en vie, autrement que pour poursuivre l'examen de conventions en vigueur, mais aussi pour ouvrir des espaces nouveaux aux négociations sur le contrôle des armements.

Il s'agit essentiellement d'une proposition d'agenda qui reflète le souhait de voir entamer la négociation d'un traité interdisant la production de matières fissiles pour la production d'armes nucléaires (*Cut off treaty*), un accord sur les garanties négatives de sécurité, une nouvelle approche des problèmes de vérification de la tenue des engagements pris et des mesures de confiance qui s'y rapportent. Ces éléments pourraient être à la base d'une relance qui permettrait d'inclure dans une démarche holistique

d'autres domaines delà politique de sécurité, touchant aux armes de destruction massive (chimiques, biologiques). Ces efforts, faute de volonté politique dans le chef de plusieurs acteurs essentiels, n'ont pas reçu l'accueil espéré au cours des premières années du 21e siècle. Ils restent toutefois représentatifs des priorités de la diplomatie belge et de sa volonté d'avancer et de participer à de nouvelles initiatives.

Le Traité d'interdiction complète des essais nucléaires

Michel ADAM

Ambassadeur honoraire
ancien Représentant permanent de la Belgique
auprès du secrétariat provisoire de l'Organisation du traité
d'interdiction complète des essais nucléaires (OTICE)

Les origines du TICE remontent aux années 1950 et aux craintes suscitées à l'époque par une multiplication très rapide des essais nucléaires, souvent pratiqués dans l'atmosphère ou dans les fonds marins sans grand souci des conséquences pour l'environnement ou pour la santé humaine. Un Traité d'interdiction partiel des essais nucléaires fut signé en 1963, devant prohiber les essais dans l'atmosphère, sous la mer ou dans l'espace. Toutefois, deux pays détenteurs d'armes nucléaires, la France et la Chine refusèrent d'y adhérer.

La signature du TNP en 1968, interdisant aux états non détenteurs d'armes nucléaires au moment de leur adhésion, l'acquisition de telles armes de quelque manière que ce soit, eut pour effet indirect d'en empêcher aussi l'essai par ces états (N.B. pour rappel, *Israël, l'Inde et le Pakistan n'ont jamais adhéré au TNP*). Les circonstances politiques ne permirent guère de nouveaux progrès dans les négociations sur le contrôle des armements nucléaires jusqu'en 1991, année pendant laquelle une conférence des états-parties au Traité partiel de 1963 décida de négocier la conversion de celui-ci en un nouvel instrument de droit international interdisant tous les essais d'armes nucléaires. Ce mandat des parties au Traité partiel fut endossé par l'Assemblée générale des Nations unies et les négociations commencèrent en 1993. Le gouvernement belge était très favorable à cette évolution et y joua un rôle diplomatique actif, notamment dans la phase finale, quand, malgré une négociation longue et souvent très difficile, le projet de texte du TICE fut présenté à l'Assemblée générale des Nations unies qui l'adopta le 10 septembre 1996. Ouvert à la signature à New York le 24 septembre 1996, le Traité fut immédiatement

signé par 71 états, notamment par les cinq états, parties au TNP dotés d'armes nucléaires (États-Unis, Russie, Royaume-Uni, France et Chine).

Principales dispositions du TICE :

L'article I formule l'interdiction absolue de tout essai d'armes nucléaires.

L'article II prévoit la création à Vienne d'une organisation internationale chargée de veiller à l'application du Traité et d'organiser la concertation régulière entre États parties (l'OTICE).

L'article III traite des mesures de mise en œuvre relevant des états liés par le TICE.

L'article IV met en place les bases d'un régime global de vérification du respect du Traité, comportant un réseau mondial de stations d'observation (« *global monitoring system* »), un centre international de collecte de données situé à Vienne (« *International Data Centre* »), un système de consultation et d'enquête, un régime d'inspections *in situ* ainsi que des mesures de confiance.

Les articles V et VI indiquent les mesures à prendre en cas de manquement aux obligations du Traité et prévoient un mode de règlement des différents pouvant résulter de son application.

Parmi les articles « techniques » du dispositif, il y a lieu de mentionner particulièrement l'article XIV qui concerne l'entrée en vigueur du Traité. Celle-ci aura lieu 180 jours après le dépôt des instruments de ratification de 44 pays dont la liste figure en annexe II au Traité. Il s'agit essentiellement des pays qui disposent d'un potentiel nucléaire que ce soit en matière de production d'énergie, de recherche ou de ressources naturelles. Certains de ces pays n'ont pas signé le Traité, c'est le cas notamment de l'Inde, du Pakistan, de la Corée du Nord. D'autres l'ont signé, mais pas ratifié comme les États-Unis, la Chine et Israël. *Les conditions requises par le Traité pour son entrée en vigueur ne sont donc pas remplies*. L'attitude des États-Unis a été définie, initialement par la position unilatérale adoptée par la majorité républicaine du Sénat, dès le second mandat du président Clinton, puis confirmée et poursuivie par l'administration Bush. Celle des autres états mentionnés ci-dessus, non signataires ou non ratificateurs était par ailleurs prévisible.

Le seuil d'entrée en vigueur était-il dès le départ trop élevé (cf. la liste des 44 états de l'Annexe 2) et le Traité est-il par conséquent mort-né ?

Il semble bien que les parties au TICE ne l'entendent pas ainsi : les signataires ont en effet annoncé et observé un moratoire sur les essais, ce qui revient à un respect factuel de la plus importante disposition du Traité.

Par ailleurs dès l'ouverture à la signature et la première vague d'adhésions une Commission préparatoire et un secrétariat exécutif provisoire furent mis en place, chargés de préparer la mise en œuvre du Traité sans attendre sa ratification par les 44 états de l'Annexe 2 et la levée des obstacles juridiques. Les états signataires (et pas seulement ratificateurs) contribuent au budget des organes provisoires, destiné essentiellement à la mise sur pied de « l'*International Monitoring System* » (IMS) et de « l'*International Data Center* » (IDC). À titre d'exemple le budget de la Commission préparatoire pour 2004 s'élevait à 94 548 700 $ US et à plus de cent millions pour 2006. Les États-Unis, malgré le rejet par le Sénat de la ratification demandée en son temps par le Président Clinton, contribuent à ce budget à raison de 22 %, la Belgique pour 1,2 %. Depuis1996, c'est donc près d'un milliard de dollars US qui ont été affectés par les signataires à la mise en œuvre d'un traité qui pourrait ne jamais entrer en vigueur.

L'IMS comporte un réseau de 321 stations d'observation de l 'environnement utilisant des techniques sismographiques, hydroacoustiques et à base d'infrasons pour recueillir des données sous terre, sous la mer et dans l'atmosphère.

En outre, 16 laboratoires radionucléides sont destinés à capter des phénomènes de radiations provenant d'éventuelles explosions (le site www.ctbto.org/vérification décrit le système et permet d'accéder à la liste des stations du réseau).

L'IDC, soutenu par une infrastructure complexe de télécommunications, recueille les données transmises par les stations d'observation (une centaine sont actives en 2006), les analyse selon leur pertinence quant à la vérification du Traité et les transmet aux états signataires depuis février 2000.

Par ailleurs, le processus politique tendant à une véritable entrée en vigueur du Traité, fondée sur des bases juridiques conformes aux dispositions adoptées, se poursuit. L'article XIV du TICE prévoit que des conférences soient organisées par les états ayant ratifié le Traité pour encourager les autres états, signataires ou non, à les rejoindre. De telles conférences ont eu lieu en 1999, 2001, 2003 et 2005, alternativement à Vienne et à New York. La Belgique, qui a ratifié dès 1999, a pris une part active à ce processus, particulièrement en 2001, lorsqu'exerçant la présidence de l'Union européenne, elle se prononça pour le maintien de la conférence programmée à New York, en marge de l'Assemblée générale de l'ONU, malgré les attentats du onze septembre. En outre, la Belgique a multiplié les démarches bilatérales pour inciter d'autres états à ratifier le Traité.

Bien que le processus de ratification inachevé empêche depuis plus de dix ans son entrée en vigueur en tant qu'instrument juridique de droit

international, le TICE garde indubitablement une valeur intrinsèque parmi les instruments politiques de contrôle des armements nucléaires. Conçu après que la faiblesse du TNP en matière de vérification ait été constatée, il a le mérite d'innover en couplant un programme complexe de récolte et de transmission de données, dont les constatations devraient être difficilement contestables si les paramètres techniques sont respectés, avec un système perfectionné de transmission de l'information et la possibilité d'inspections et de vérifications sur place. C'est cette expérience que même les pays non ratificateurs, et en premier lieu les États-Unis tiennent à sauver, en raison de sa valeur de test, voire d'exemple pour d'autres domaines de la sécurité internationale.

PARTIE VIII

CONCLUSION

Histoire du nucléaire en Belgique (1990-2005)

Conclusion

Léon BINDLER, Pierre GOVAERTS
et André L. JAUMOTTE

Belgonucleaire
Président d'AVN
Professeur émérite à l'ULB

Durant les années 1990-2005, l'atmosphère politique et sociale en Belgique a été peu favorable au nucléaire.

Malgré cette circonstance défavorable, un travail remarquable a été effectué dans tous les domaines : enseignement supérieur, recherche, production d'électricité, technologie, applications médicales, sureté nucléaire, diplomatie.

Dans le domaine de l'enseignement universitaire, l'aboutissement est unique : un seul enseignement, en anglais, dans le cadre du SCK•CEN et cela pour les universités des deux régimes linguistiques. À l'issue de ce processus, on constate une progression du nombre d'étudiants inscrits.

Dans le domaine de la recherche nucléaire fondamentale, le point a été fait sur le travail effectué en Belgique, y compris avec les outils du CERN (Centre d'études et de recherches nucléaires – Genève) ainsi que dans le domaine de la fusion nucléaire, ce qui nous associe à la construction de ITER qui sera localisé en France.

La politique de l'Union européenne (UE) dans le domaine de l'énergie compte trois volets : lutter contre le changement climatique, réduire la vulnérabilité extérieure de l'UE à l'égard des importations de gaz et d'hydrocarbures, promouvoir l'emploi et la croissance en fournissant aux consommateurs une énergie sûre et abordable.

Dans ce cadre, quelle est la vision de l'UE sur l'avenir du nucléaire ?

Actuellement, environ un tiers de l'électricité et 15 % de l'énergie consommée dans l'UE proviennent du nucléaire qui est un élément de réduction des émissions de CO_2 dans l'atmosphère.

L'électronucléaire est moins vulnérable aux fluctuations de prix du combustible et les sources d'approvisionnement en uranium sont suffisantes.

L'UE table sur une augmentation de la consommation d'énergie nucléaire *dans le monde* 368 GW en 2005 à 416 GW en 2030 mais sur une réduction pour les pays de l'OCDE Europe de 131 GW en 2005 à 74 GW ou 110 GW en 2030 selon le scénario.

Dans un tel cadre, il est souhaitable qu'une politique énergétique européenne s'élabore progressivement et que – pour le nucléaire – des règles adaptées concernant la sureté et la sécurité soient acceptées dans toute l'UE.

Les politiques des pays de l'UE concernant l'avenir de la production électronucléaire sont divergentes. La Belgique appartient au groupe des pays qui – à terme – ont décidé de sortir du nucléaire.

Cette décision est de caractère purement politique. Elle n'a pas pris en compte les deux rapports qui ont été demandés par le gouvernement à des Commissions indépendantes : le rapport AMPERE et le rapport *Énergie 2030* (2007).

La genèse de la loi de 2003 relative à la sortie du nucléaire est synthétisée dans ce volume.

Malgré cette circonstance défavorable, l'Histoire du nucléaire en Belgique (1990-2005) montre parfaitement ce qui a été accompli par les bureaux d'études, par les exploitants des Centrales de Doel et de Tihange, y compris dans les domaines de la sureté et de son contrôle par AVN et pour le stockage des déchets par l'ONDRAF/NIRAS et le SCK•CEN.

Une première unité a été démantelée, BR3, avec acquisition d'une expérience importante du SCK•CEN.

En ce qui concerne les déchets nucléaires et leur stockage, des progrès remarquables ont été accomplis et certaines décisions ont été prises. Elles concernent :

- La meilleure utilisation de la capacité disponible en autorisant le traitement de déchets étrangers par Belgoprocess.
- La décision du gouvernement fédéral de stocker les déchets de faible activité à Dessel, après concertation avec les autorités locales et l'ONDRAF/NIRAS.
- La solution du problème des sources orphelines, c'est-à-dire des sources d'origine inconnue.

Ces décisions ont été prises par le ministre Verwilghen. On peut regretter d'autres décisions prises antérieurement, notamment :

- La loi portant sur la sortie du nucléaire.
- La non-reconduction du contrat concernant le traitement des combustibles usés à l'usine de la Hague, en contradiction avec la politique générale de recyclage des matières prônée par les écologistes, ce qui a entraîné – *in fine* – la fermeture de l'usine de Dessel de fabrication de combustible MOX.
- Le refus de la demande d'autorisation faite par la BN de l'accueil et du retraitement de 45kg de plutonium militaire américain qui ont finalement été transformés en combustible MOX à Cadarache (France). La fermeture de l'usine de Dessel de fabrication de combustible MOX est la conséquence de décisions politiques (fin de fabrication durant l'été 2006). Elle sera suivie par le démantèlement. L'éventualité de fabrication en Belgique du combustible MOX à partir de plutonium militaire avait été proposée dès 1989 (Amaldi Conference). Cette proposition a subi des avatars divers jusqu'à ce qu'une possibilité s'ouvre de traiter 45kg de plutonium militaire américain. Le secrétaire d'État à l'énergie, O. Deleuze, a refusé que cette initiative soit poursuivie.

En ce qui concerne le stockage des déchets hautement radioactifs, la possibilité du stockage géologique en couche d'argile profonde a été démontrée à Mol, par la réalisation des deux galeries expérimentales, sous le contrôle de l'ONDRAF et du SCK•CEN.

Le nucléaire est de plus en plus important au service de la vie (médecine nucléaire). Le chapitre consacré à l'usage médical des isotopes radioactifs et de leurs différentes émissions de rayonnements ionisants, offre un survol rapide mais approfondi des contributions des différentes branches de la médecine nucléaire. Ainsi, après une introduction générale, les différentes techniques de routine en diagnostic, exercées dans le cadre de la médecine nucléaire clinique, sont décrites avec mention spéciale pour la pathologie thyroïdienne. Cette partie est suivie par une évaluation actualisée de la contribution la plus moderne des techniques nucléaires, à savoir du PET-CT qui est devenu depuis dix ans environ, la technique diagnostique de « golden standard » en oncologie. Ces synthèses sont logiquement complétées par la description des différentes méthodes thérapeutiques, surtout oncologiques, offertes par l'emploi adéquat des radioisotopes.

L'IRE a développé ses activités sur le site de Fleurus sur la base des activités initiées au SCK•CEN : production d'isoptopes à usage médical et export vers différents pays dans le monde, démantèlement de sources radioctives scellées, développement de mesures de très basse radioctivité.

L'industrie belge a fait ses preuves dans le domaine de la production de cyclotrons pour usage médical ou autre (IBA, spin-off de l'UCL créée en 1986). Les cyclotrons sont exportés dans divers pays. La société IBA est devenue une référence mondiale dans le domaine de la radiothérapie et est unique en protonthérapie.

L'ensemble de la partie consacrée à la médecine nucléaire constitue une entité cohérente qui contient peut-être l'argumentation la plus convaincante en faveur de la reconnaissance de l'apport positif du nucléaire dans l'intérêt des sciences médicales et de la santé publique dans son sens large, notion qui n'apparaît que trop rarement dans les débats sociétaux au sujet de l'avenir du nucléaire.

Malgré le cadre limité par les choix politiques effectués, la Belgique a très bien œuvré dans le domaine de l'information locale (le Forum nucléaire), de la participation à l'action scientifique internationale (Pugwash, Amaldi Conférences organisées sous l'auspice de l'Accademia dei Lincei), dans le domaine diplomatique, notamment à l'AIEA où Pierre Goldschmidt a occupé, de 1999 à 2005, les fonctions de directeur général adjoint, responsable du département des Garanties.

La Belgique dispose d'un cadre juridique prévoyant des mesures de surveillance aux stades de la fabrication, de l'utilisation, du stockage et du transport des matières nucléaires et radioactives, nous mettant en capacité de contribuer à la prévention de la prolifération nucléaire.

Le ciel politique du domaine nucléaire belge reste gris. Jusqu'à présent, le sol reste fertile, que ce soit l'enseignement supérieur, la recherche pure ouverte sur la collaboration internationale, la production électronucléaire (du bureau d'études au démantèlement des installations et au stockage des déchets radioactifs), le transport des déchets radioactifs, tout le domaine de la médecine nucléaire, l'industrie nucléaire, qu'il s'agisse d'outils comme les cyclotrons ou du marché du diagnostic et de la thérapie nucléaire dans le traitement des cancers (IBA, IRE, diverses PME).

La compétence maintenue est remarquable. L'Histoire du Nucléaire en Belgique tente de le démontrer. Aussi, la BNS, après avoir publié « Un demi-siècle de nucléaire en Belgique », l'a complété par la période 1990-2005, période plus difficile.

Puisse cette histoire être utile et servir à la réflexion dans le monde politique et le monde de l'environnement.

Puisse-t-elle aussi éclairer la population car l'aspect psycho-social du problème est évident.

De grands projets de recherche sont en cours pour l'avenir, particulièrement MYRRHA qui serait intégré dans le site de Mol du SCK•CEN. Cette machine comprend un accélérateur de protons de type avancé, pilotant un réacteur sous-critique à spectre rapide. Elle vise la recherche

sur la transmutation des déchets de haute radiotoxicité, la recherche sur la production de radioisotopes médicaux et la recherche sur les matériaux des réacteurs du futur. Elle serait une plate-forme européenne qui permettrait à l'Europe de conserver un outil de recherche dans le domaine des réacteurs à neutrons rapides, qui représentent 3 des 6 projets retenus au niveau international dans le cadre des réacteurs de quatrième génération. En effet, le seul réacteur à neutrons rapides fonctionnant encore en Europe est PHENIX, réacteur de démonstration entré en service en 1973 et dont la fin de vie est prévue en 2009. La réalisation de MYRRHA exige une collaboration internationale. On peut conclure que la Belgique a bien œuvré dans le passé et espère continuer à le faire dans le cadre de la directive européenne de Lisbonne (mars 2002) visant à faire de l'Europe une économie basée sur la connaissance la plus dynamique et la plus compétitive.

Au lieu de créer de temps à autre des Commissions *ad hoc* comme la Commission AMPERE ou la Commission *Énergie 2030*, il serait judicieux que la Belgique se dote d'une structure à caractère permanent semblable à l'OPECST (Office parlementaire d'étude des choix scientifiques et technologiques) qui existe en France, et permet d'éclairer les parlementaires de manière objective.

Puisse le monde politique belge le comprendre et y participer.

Enfin, que pourra-t-on conclure de ces quinze ans d'histoire nucléaire?

Le déclin du domaine nucléaire belge fut amorcé par la carence de l'État, législatif comme exécutif.

Il se marque, entre autres, par :

- la liquidation de la Belgonucleaire (BN) et la fermeture de son usine de fabrication de combustible MOX à Dessel, alors que l'usine MELOX à Marcoule (France) est autorisée à augmenter sa capacité de production pour pouvoir honorer ses contrats ;
- le démarrage difficile et l'efficacité discutée de l'Agence fédérale de contrôle nucléaire (AFCN), créée par la loi en 1994, dépendante du ministère de l'Intérieur ;
- les obstacles rencontrés dans la filialisation des organismes agréés de contrôle nucléaire avec l'AFCN ;
- le déficit prévu du parc de production d'énergie électrique belge dans les prochaines années.

Tout peut encore être sauvé par l'action du monde politique belge, mais, pour l'instant, il semble peu sensible à cette problématique pourtant essentielle.

Abréviations

^{18}F-FDG	2-fluoro-2-d-desoxyglucose
A3X	Déchets contaminés en émetteurs alpha
ABR-BVS	l'Association belge de radioprotection – Belgische Vereniging voor Stralingsbescherming
ADONIS	*Accelerator Driven Operated New Isotope System*
ADS	*Accelerator Driven Systems* : systèmes sous-critiques pilotés par un accélérateur, en vue de la transmutation des déchets radioactifs à longue durée de vie
AEN	Agence pour l'énergie nucléaire (de l'OCDE)
AFCN-FANC	Agence fédérale de contrôle nucléaire
AFSCA	Agence fédérale pour la sécurité de la chaîne alimentaire
AGORIA	Fédération multisectorielle de l'industrie technologique
AIPES	*Association of Imaging Producers & Equipement Suppliers*
ALMERA	ALMERA, coordonné par l'AIEA
ALWR	*Advanced Light Water Reactors*, avec les distinctions : APWR (à eau sous pression) et ABWR (à eau bouillante)
Amaldi conferences	Conférences organisées dans le cadre du traitement du plutonium nucléaire
ApPEC	*Astroparticle Physics European coordination* pour la physique des astro-particules, créé en 2000
ARBIS	Règlement général pour la protection contre les rayonnements ionisants (arrêté royal du 20/01/2007)
ASME XI	*Amercian Society of Mechanicval Engineers*, *Code ASME*, *Section XI* pour les inspections en service
ASN	L'autorité de sûreté nucléaire française
AV Controlatom	AIB-Vinçotte Controlatom ; organisme agréé de Classe I

AVN	Association Vinçotte Nucléaire, organisme agréé de Classe I
Bâtiment DE	À Tihange, le bâtiment DE (« Extension » du bâtiment existant « D ») est bunkérisé et abrite les piscines de stockage temporaire de combustible usé
BELAC	Groupement des organisations belges d'accréditation et d'étalonnage, Beltest, OBE
BELGATOM	Groupement de Tractebel et Belgonucleaire pour le marché étranger
Belgonucleaire	Société belge qui a mis au point la production de combustible mixte U02 – PuO2
Belgoprocess	Société de traitement de déchets radioactifs (faisant partie de l'ONDRAF)
BERD	Banque européenne de reconstruction et de développement
BNEN	*Belgian Nuclear higher Education Network*
BNS	*Belgian Nuclear Society*
BR1	*Belgian Reactor One.* BR1 est un réacteur d'une puissance de 4MW, refroidi par air et utilisant le graphite comme modérateur
BR2	*Belgian Reactor Two.* Un des réacteurs de recherche les plus puissants au monde. Il est utilisé pour tester des matériaux et des combustibles destinés à divers types de réacteur et pour le programme européen de fusion
BR3	*Belgian Reactor Three.* BR3 était un prototype de réacteurs à eau pressurisée (PWR)
BRA	Installation de traitement et de bitumage (site BP2)
BWR	*Boiling Water Reactor*
CA	Conseil d'administration
CALLISTO	*Capability for Light Water Irradiation in Steady-state and Transient Operation*
CANR	Le Comité des activités nucléaires réglementaires (OCDE/OECD)
CARINA	*Challenges and Advanced Research In Nuclear Astrophysics*
CASSANDRE	Un code de calcul diffusion multigroupe dépendant du temps, développé à l'ULB (MN)

CASTOR	Conteneur pour stockage et de transport de combustible
CCE	Commission de la Communauté européenne
CE	Commission européenne
CEA-LETI	Le CEA-LETI est la division « Technologie avancée » du Commissariat à l'énergie atomique de France chargée des transferts à l'industrie
CEEA	Communauté européenne de l'énergie atomique
CEFRI	Organisation qui certifie des organisations pour la réalisation de travaux dans des installations nucléaires en France
CEK Expert group	*Group for Communication, Education and Knowledge Management* créé en 2006. La mission de CEK est d'informer le public sur l'expertise et la vision du SCK•CEN, de soutenir la dissémination de l'information et d'encourager une culture de débat
CERN	Centre européen de recherches nucléaires
CETRAD	*Co-ordination Action on Education and Training in Radiation Protection and Radioactive Waste Management*
CGEE	Comité de gestion des entreprises d'électricité
CHERNE	*Cooperation in Higher Education on Radiological and Nuclear Engineering*, réseau européen constitué en 2005
CILVA	Installation de Belgoprocess pour le traitement et le conditionnement de tous les déchets de faible activité produits en Belgique. Elle comprend une unité de supercompaction, une unité d'incinération et une unité de cimentation
CIPR (ICRP)	Commission internationale de protection contre les radiations (*International Commission on Radiation Protection*)
CIS Bio	Société française de production radiopharmaceutique à usage diagnostique et thérapeutique
CISAC (NAS, USA)	Commission pour la sécurité internationale et le contrôle des armements créée en 1980 au sein de la *National Academy of Sciences* (NAS)

COBRA3C	Code de calcul thermo-hydraulique de sous-canal du cœur
COGEMA	Compagnie générale des matières nucléaires
COMETHE	Code développé par la BN et qui modélise le comportement thermique et mécanique des crayons combustibles de tout type
Commission 2030	Commission créée par le Service fédéral du gouvernement énergie pour évaluer les besoins d'énergie à l'horizon 2030
Commission AMPERE	Commission pour l'analyse des modes de production de l'électricité et le redéploiement des énergies
COMMOX	Société de marketing et de vente de MOX, fondée fin 1984, par BN avec Cogema
CONCERT	*Concertation of regulatory tasks* : forum créé par la CE qui permet des échanges entre les gestionnaires des autorités de sûreté des pays occidentaux et de l'Est
CORYS	Société de développement de simulateurs
CPPMN	Protection physique des matières nucléaires
CRC	Centre de recherches du cyclotron de l'Université catholique de Louvain (UCL)
CREG	Commission de régulation de l'électricité et du gaz
CST	Comité scientifique et technique » d'AVN (et AVC jusque 2005)
DEMON	Détecteur modulaire de neutrons rapides
DES	Diplôme Spécialisé en Génie nucléaire
DGSNR	Directorat général de la sûreté et de la radioprotection en France (devenu plus tard ASN)
DGTRE	Direction générale des technologies, de la recherche et de l'énergie de la Région wallonne
Directive européenne 96/26/EURATOM	Définit et décrit les tâches de l'expert qualifié la communication 98/C 133/03 de la Commission concerne la mise en œuvre de cette directive
DNBR	*Departure from Nucleate Boiling Ratio* : flux de chaleur critique calculé divisé par le flux de chaleur maximum admis
DOE	*Department of Energy of the USA*
Dynamitron©	Accélérateur d'électrons linéaire

EANM	Association européenne de médecine nucléaire
ECFA	L'ECFA (*European Committee for Future Accelerators*) pour la physique des particules
ECG	Électrocardiogramme
ECTS	*European Credit Transfer System*
ECURIE	*European Community Urgent Radiological information exchange*
EFDA	L'organisme qui coordonne la recherche de fusion en Europe
EFET	*European Fusion Engineering and Technology*
EFIT	*European Facility for Industrial Transmutation*
EMAS	*Environmental Management Accrediation System*
ENAC	Groupement d'ingénieries européennes
ENDAN	États non dotés d'armes nucléaires
ENEN	*European Nuclear Educational Network*
ENETRAP	*A project working on a European harmonised approach for education and training programmes in radiation protection*
ENIQ	*European Network for Inspection Qualification*
EPP	Conception de réacteur européen, similaire au AP 1000
EPR	*Evolutionary (European) pressurised water reactor*
EPRI	*Electric Power Research Institute*, laboratoire de recherche de l'industrie électrique américaine
EPS – PSA	Études probabilistes de sûreté – *Probabilistic Safety Analysis*
ERASMUS	Le premier tokamak universitaire européen
ERM-KMS	École royale militaire – *Koninklijke militaire school*
ESA	*European Space Agency*
EUR	*European Utility Requirements*
EURDEP	*European Data Exchange Platform*
EURIDICE	Le laboratoire HADES est exploité par EURIDICE, le groupement d'intérêt économique entre NIRAS/ONDRAF (l'organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies) et le SCK•CEN

Eurobitum	Installation de traitement et de bitumage (site BP1)
EURONS	*EUROpean Nuclear Structure*, lequel rassemble tous les laboratoires européens de physique nucléaire ; ce programme prolonge, et amplifie, pour la période 2002-2007, les programmes antérieurs FINA (*Frontiers In Nuclear physics and Astrophysics*, 1997-2000) et FINUPHY (*Frontiers In NUclear PHYsics*, 2000-2005), lesquels avaient été coordonnés par le CRC. Au sein du programme EURONS, le CRC coordonne la partie concernant l'astrophysique nucléaire, via le sous-programme CARINA (*Challenges and Advanced Research In Nuclear Astrophysics*)
EUROTRANS	*European Research Programme for the Transmutation of high level nuclear waste in an accelerator driven system*, en liaison avec le projet MYRRHA du SCK•CEN. Ce programme de recherche est financé par la Commission européenne
EUTERP	*European Platform on Training and Education Radiation Protection*
FANC – AFCN	*Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle* – Agence fédérale de contrôle nucléaire
FBFC	Franco-Belge de fabrication de combustible
FICAR	Code développé pour effectuer la caractérisation radiologique des assemblages de combustible irradié
FIL London	*Functional Imaging Laboratory* de Londres
FINA	*Frontiers In Nuclear physics and Astrophysics*, 1997-2000
FINUPHY	*Frontiers In NUclear PHYsics*, 2000-2005
FNRS – NFWO	Fonds national de la recherche scientifique / *Nationaal Fonds voor Wetenschappelijk Onderzoek*
FOM	Laboratoire de Rijnhuizen pour *Fundamenteel Onderzoek van Materie*
FPM	Facultés polytechniques de Mons
FYNU	L'Institut de physique nucléaire (FYNU) du Département de physique et au Centre de recherches du cyclotron (CRC)
GENEPI	Accélérateur deutéron pour le projet GUINEVERE

GGS	*Gediplomeerde in de Gespecialiseerde Studies Nucleaire Kerntechniek*
GTMHR	*Gas Turbine-Modular Helium Reactor*
GUINEVERE	Un projet qui fait partie du sixième programme cadre « IP-EUROTRANS » et qui a pour but d'examiner les principaux aspects en vue du développement du ADS (*Accelerator Driven Systems*) dans le cadre du P&T (*Partitioning & Transmutation*), dont le but final est de réaliser une réduction des volumes et de la radiotoxicité des déchets nucléaires
GV	Générateurs de vapeur
HADES	Le laboratoire HADES situé à 225 m de profondeur a pour but l'étude des formations argileuses comme site potentiel de dépôt pour les déchets hautement radioactifs et de longue demi-vie
HE Spaak	Haute école Paul-Henri Spaak
HEMES	Haute école mosane d'enseignement supérieur
HRA/Solarium	Stockage temporaire de déchets radifères, déchets non radifères et déchets spéciaux au site BP1 de Belgoprocess
HTGR	*High Temperature Gas Cooled Reactor*
IAEA	*International Atomic Energy Agency*
IARC	*International Agency for Research on Cancer, WHO* – Centre international de recherche sur le cancer, OMS
IBA	*Ion Beam Applications*
IBT	*International Brachytherapy*
ICRH	Chauffage ion-cyclotronique
IEA	*International Energy Agency* / L'Agence internationale de l'énergie
IFMIF	*International Fusion Material Irradiation Facility*
IIHE	Institut interuniversitaire des hautes énergies
IISN/IIKW	Institut interuniversitaire des sciences nucléaires
IJS Ljubljana	*Institute Joseph Stefan Ljubljana*

INAMI	Institut national pour l'assurance des maladies et l'invalidité
INSTN-Saclay	Institut national des sciences et techniques nucléaires (CEA)
IRE	Institut de radioéléments à Fleurus
IRRT – IRRS	*International Regulatory Review Teams* – devenu *International Regulatory Review Service* de l'AEIA
IRS	*Incident Reporting System* de l'AIEA et de l'OCDE
ISI	Institut supérieur industriel
ISIB	Institut supérieur industriel de Belgique à Bruxelles
ISO 9000	*International Standards Organisation*, Standard sur la gestion de la qualité
isRP	*International school of Radioprotection* du SCK•CEN
ITER	Réacteur de fusion expérimental international
JET	*Joint European Thorus project* (Culham, Grande Bretagne)
KULeuven	*Katholieke Universiteit Leuven*
L'ECFA	*European Committee for Future Accelerators*
Leak Before Break	Un concept qui est basé sur la détection de fuites de systèmes sous pression avant l'apparition d'une grande rupture
LHMA	Le laboratoire de haute et de moyenne activité du SCK•CEN qui évalue les conséquences de la radiation sur des matériaux utilisés dans les installations nucléaires actuelles et futures
LLWAA	*Low Level Waste Activity Assessment code*
LOCA	*Loss of Coolant Accident*
LOFT	*Loss of Fluid Test*
LPP – ERM/KMS	Laboratoire de physique des plasmas de l'École royale militaire – *Koninklijke Militaire School*
MBA	*Master of Business Administration*
MDS Nordion	Société produisant des radioisotopes, surtout pour usage médical

MEDIRIS	Installation d'irradiation à l'IRE, qui comporte deux irradiateurs constitués de sources cobalt-60, reprise finalement par Sterigenics
MELISSA	Écosystème fermé en utilisant des bactéries et des plantes, instrument exceptionnel pour le développement de la technologie du recyclage de l'air, de l'eau et des déchets sur terre, même sur le plan industriel
MELOX	Usine de fabrication de MOX de la Cogema
MIMAS	Procédé de fabrication de MOX, mis au point par Belgonucleaire
MINATOM	Ministère d'énergie atomique en Russie
MMN	Métallurgie mécanique nucléaire, filiale de FN et située à Dessel, pour le transport d'éléments de combustible UO^2 frais vers les centrales belges de Doel et de Tihange (reprise par Framatome en 1974)
MN	Service de métrologie nucléaire de l'ULB
MONA	Partenariat entre la commune et l'ONDRAF à Mol
MOX	Combustible à oxyde mixte (*Mixed Oxyde Fuel*)
MUMMIE	Installation de traitement et de bitumage (site BP2)
MYRRHA	*Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications* est un *Accelerator Driven Sub-critical System* (ADS).
NAS (USA)	*National Academy of Sciences* qui comprend une Commission pour la sécurité internationale et le contrôle des armements (CISAC), crée en 1980
NCT	Société privée de droit français spécialisée dans le transport de matières radioactives
NERI	*Nuclear Energy Research Initiative*
NIH (USA)	*National Institute of Health*
NIRAS	Voir ONDRAF
NORM	*Naturally Occurring Radioactive Materials* – Matériaux naturellement radioactifs
NPT	*Non Proliferation Treaty*
NRWG	*Nuclear Regulators Working Group de la CE*
NSG	*Nuclear Suppliers Group*

NuPECC	*Nuclear Physics European Collaboration Committee* pour la physique nucléaire créé en 1989
NUSSC	Comité établi par l'AIEA pour coordonner le travail du revu des codes et guides dans le domaine de la sûreté nucléaire
NuTeC	*Nuclear Technological Center*
OA	Organisme(s) agréé(s)
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OHSAS 18001	*Operational Health and Safety Accrediation System*, Standard 18001
ONDRAF	Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies, créé par la loi du 8 août 1980 et l'arrêté royal du 30 mars 1981
OSA	*On-Site Assistance* : assistance aux exploitants dans les pays de l'Est
OSART	*Operational Safety Review Team* (IAEA)
OVAM	*Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij*
PaLoFF	Partenariat entre la commune et l'ONDRAF à Fleurus
PALOFF	Partenariat local Fleurus – Farciennes
PAMELA	Initialement conçue pour la vitrification des déchets liquides de haute activité, traite, à partir de 2007, certains déchets des passifs nucléaires et des déchets similaires de production courante
PANTHER	Code de calcul neutronique de cœurs de réacteur
PE	Service de physique électronique de l'ULB
PET	*Positron emission tomography*
PET CT	*Positron emission tomography – Computed Tomography*
PHARE	*Poland and Hungary Assistance for the Restructuring of the Economy* (devenu un programme d'assistance à tous pays qui avaient demandé leur accession à l'Union européenne)
PISA	Programme de l'intégration des aspects sociaux dans la recherche nucléaire (SCK•CEN)
PME	Petite et moyenne entreprise

POSEIDON	*POol Side Equipment for Irradiation and DOping of silicon by Neutrons*
PPCS	*Power Plant Conceptual Study* : en marge des études pour ITER
PRACLAY	Test de démonstration dans lequel le système de stockage souterrain dans de l'Argile de Boom est examiné sur échelle réelle et pour des températures représentatives d'un stockage de déchets vitrifiés hautement radioactifs
PSP – ULB	Unité de physique statistique et plasmas de l'Université libre de Bruxelles
Pughwash	Soutien à l'élimination des armes nucléaires, organisation des conférences relatives à ce sujet
PWR	*Pressurised Water Reactor*
RAMG	*Regulatory Assistance Management Group*
RAPHAEL	*ReActor for Process heat, Hydrogen And ELectricity generation*
RASC	Comité établi par l'AIEA pour coordonner le travail du revu des codes et guides dans le domaine de la radioprotection
REBUS	Le programme REBUS, réalisé de 2000 à 2005, avait pour but de valider les codes de calcul du transport neutronique dans le cadre de l'application du « *burn-up credit* »
RELAP-5	Code thermo-hydraulique système
Resolution 1540	Résolution du *UN Safety Council* (2004) qui essaie d'éviter la prolifération d'armes de destruction massive (nucléaires, biologiques, chimiques)
Rhodotron©	Accélérateur d'électrons
RIT/KTH	*Royal Institute of technology/Kunghiga Techniska Högskolan, Stockholm*
RMN (NMR)	Résonance magnétique nucléaire
RODOS	Système qui sert à mieux évaluer l'incidence radiologique, à moyen et à long terme
RSWG	*Reactor Safety Working Group (CE)*
RTV	Accident de dimensionnement : Rupture de tuyauterie vapeur
SAFIR et SAFIR 2	*Safety Assessment and Feasibility Interim Report* (publié resp. en 1989 et 2001)

SAMES	Accélérateur électrostatique de l'ULB
SBMN	Société belge de médecine nucléaire, est présente sous le site www.belnuc.be
SBWR	*Simplified Boiling Water Reactor*
SCG	*Splijtstof Container Gebouw* ou Bâtiment de stockage de conteneurs à Doel pour le stockage temporaire de combustible usé
SCK•CEN	*Studiecentrum voor Kernenergie* – Centre d'études nucléaires – Mol
SIDONIE	*Silicon Doping by Neutron Irradiation Experiment*
SMP	Usine de MOX sur le site de Sellafield
SNCB	Société nationale des chemins de fer belge
SPECT	*Single photon emission computed tomography*
SPECT-CT	Combinaison entre une gamma caméra SPECT et un *computed tomography* (CT) *scanner*
SPERANSA	*Stimulation of Practical Expertise in Radiological and Nuclear Safety*
SPRI	Le service de protection contre les rayonnements ionisants
SSTIN	Le service de la sécurité technique des installations nucléaires
Sterigenics Belgium Fleurus	Société américaine d'irradiation de matériaux
STOLA	Partenariat entre la commune et l'ONDRAF à Dessel
Stretch-out	Fonctionnement en fin de cycle : continuation de l'exploitation par réduction de température moyenne et de la puissance
TACIS	*Technical Assistance to the Commonwealth of Independent States (CE)*
TE	Tractebel, Ingénieur architecte belge
TEC	*Trilateral Euregio Cluster* (ERM/KMS, Forschungszentrum Jülich, FOM) qui constitue le premier exemple d'un cluster inter-européen en fusion
Technitest	Organisme agréé
TELERAD	Système de surveillance de la radioactivité de l'État belge

TEP	Tomographie d'émissions de positons (PET)
TEXTOR	Tokamak de l'« Association Euratom-KFA » de Jülich pour l'étude du confinement des plasmas
TGV	Centrale électrique Turbine gaz vapeur
TICE	Traité d'interdiction complète d'essais nucléaires
TN17T	Conteneur pour TN17T pour le transport sur site vers le stockage en piscine de la centrale de Tihange
TN24	Conteneur pour le stockage à sec à Doel
TNB	TRANSNUBEL
TOKAMAK	Réacteur expérimental avec confinement toroïdal du plasma
TPEG	*Twinning Programme Engineering Group*
Tractebel Engineering	Ingénieur architecte belge
TRANSNUBEL	Société de transport de matières radioactives et nucléaires, établie par Belgonucleaire et Transnucléaire international, qui offre aussi des services associés à ce transport
TRANSRAD	Société anonyme de droit privé créée le 18 janvier 1988 pour des transports de matières radioactives
TRANSSC	Comité établi par l'AIEA pour coordonner le travail du revu des codes et guides dans le domaine du transport de matières radioactives
TRASYS	Société de Tractebel, spécialisée en informatique
TSO	*Technical Safety Organisation*
UCL	Université catholique de Louvain
UGent, RUG	Rijksuniversiteit Gent
ULB	Université libre de Bruxelles
ULg	Université de Liège
UMH	Université Mons-Hainaut
UOX	Combustible d'oxyde d'uranium (*Uranium Oxyde Fuel*)
USNAS	*United States National Academy of Sciences*
USNRC	*United States Nuclear Regulatory Commission*

VENUS	*Vulcain Experimental Nuclear Study*. L'installation à puissance nulle VENUS permet une analyse détaillée des configurations de cœur, y compris du MOX et de combustibles à haut degré d'épuisement (*burn-up*). Il est utilisé de manière intensive pour la validation de configurations de cœur de réacteurs et de codes de criticité
VIP	*Venus International Program*
VIPEX	*VIP Extension*
VIPO	*Void coefficient measurement In Plutonium Oxide lattices*
VISIPLAN – VISIMODELLER	VISIPLAN 3D ALARA est un programme pour PC développé pour l'analyste ALARA, VISIMODELLER permet d'introduire des modèles CAD directement utilisables par VISIPLAN
VUB	*Vrije Universiteit Brussel*
WANO	*World Association of Nuclear Operators*
WASSC	Comité établi par l'AIEA pour coordonner le travail du revu des codes et guides dans le domaine du traitement des déchets
WENRA	*Western European Nuclear Regulators Association*
WPNS	*Working Party on Nuclear Safety, which provides technical support to the Atomic Questions Group which itself advises the EU Council of ministers*
XIOS-HL	Institut de hautes études d'ingénieur industriel à la *Hogeschool Limburg* (*eXpertisecentrum voor Industrie, Onderwijs en Samenleving*)
XT-ADS	Un pré-design avancé d'une machine expérimentale pour le court terme (XT-ADS = *eXperimental demonstration of Transmutation in an ADS*)
Zangger Committee	Groupe officieux de 15 pays qui, sous la présidence de Claude Zangger, se sont mis d'accord sur la définition des équipements ou matières spécialement conçus pour le traitement, l'utilisation et la production de matières fissiles et sur les conditions qui régiraient leurs exportations. Les règles du jeu fondamentales ainsi établies ont été publiées dans le INFCIRC/209 de l'AIEA

Visitez le groupe éditorial Peter Lang
sur son site Internet commun
www.peterlang.com

À travers l'histoire nucléaire belge de 1990 à 2005, cet ouvrage a pour but principal la consolidation des connaissances et des expériences acquises dans les différents domaines des applications nucléaires pacifiques. En effet, ces quinze années ont connu des développements belges importants et novateurs dans la recherche scientifique et appliquée, la technologie, l'ingénierie et les applications médicales. Parallèlement, les aspects de la non-prolifération ont acquis une importance fondamentale et la Belgique s'est investie dans les différentes négociations internationales concernées. Par ailleurs, l'opinion publique s'interroge davantage au sujet du nucléaire et la consultation active et novatrice des communes dans le cadre de la gestion des déchets radioactifs s'est érigée en référence internationale.

Ce livre illustre dès lors ces activités belges très variées dans les disciplines importantes. Il fait suite à un premier volume qui couvrait la période antérieure, caractérisée par les grandes avancées dans la recherche scientifique et dans les applications industrielles.

MARCEL MARIS est docteur en sciences appliquées de la Katholieke Universiteit Leuven et maître en sciences de l'Université de Californie, Berkeley. En tant qu'ingénieur à l'Association Vinçotte Nucléaire (AVN), il a été en charge d'inspections de centrales nucléaires belges et il a acquis 15 ans d'expérience dans la sûreté des réacteurs industriels russes. Il est actuellement directeur en charge des projets d'analyse de sûreté relatifs aux installations nucléaires belges et étrangères.

ANDRÉ JAUMOTTE est professeur émérite de l'Université libre de Bruxelles. Il a été co-président de la Commission d'évaluation belge en matière d'énergie nucléaire (1976-1982-1988), vice-président de la Belgonucleaire (1983-1995), président d'AVN (1981-2002) et membre (actuellement membre honoraire) du Conseil d'administration du CEN•SCK. Il est membre de l'Académie royale de Belgique (Classe des sciences) et membre étranger de l'Académie des sciences (Paris). Il est Docteur *honoris causa* de quatre universités.

PIERRE GOVAERTS a un PhD de l'Université de Californie, Berkeley. Il a travaillé sur la physique des réacteurs à neutrons rapides au CEA-Cadarache et a enseigné la sûreté des réacteurs à l'ULB. Il a également été en charge de la vérification des analyses de sûreté des centrales nucléaires belges et directeur général d'AVN dont il est l'actuel président. Depuis 2001, il préside le Groupe Permanent Réacteurs auprès de l'Autorité de sûreté nucléaire française.

ISBN 978-90-5201-377-0

P.I.E. Peter Lang
Bruxelles