

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'événements 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 traduit 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 créé 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 demi-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. Belgonucléaire 1990-2005

La Belgonucléaire (BN) a développé un vrai savoir-faire dans le domaine de la technologie de la fabrication du combustible mixte UO₂-PuO₂ 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 1^{er} 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 événements 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 1^{er} mai 2004 et au 1^{er} 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 thérapie, 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 ¹⁸F-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 [¹⁸F]-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 1^{er} 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 moyen et 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 21^e 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 vermindert, alhoewel het nucleaire domein nog altijd verschillende mogelijkheden

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 inter-universitaire (PAI) die sedert 2002 de theoretici en experimentatoren 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 toepassingen en ruimtetoeepassingen, 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 micro-elektronica. 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, gevolgd 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 aanvaardingsstelsel 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 vooreringen 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 verschaftte 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 MOXsplijststof. Meer dan 300 transporten van MOXsplijststofelementen naar kerncentrales in België, Duitsland en Zwitserland werden uitgevoerd. De firma nam tevens deel aan opslag van bestraalde splijststof 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 splijststof heeft deze ontwikkeling versneld, met focus op de beginfase van de splijststofcyclus 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 splijststof. 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 studiebureau 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 beeldvormingstechnieken.

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 beeldvormingstechniek 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 jodium 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 voortvloeiende gevaren en houdende de oprichting van het 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 milieu, 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 partijen 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 21^e 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.