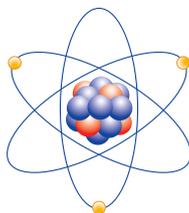
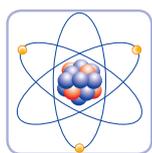


Comprendre

Le  
**Nucléaire**

Février 2010

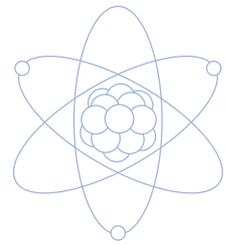




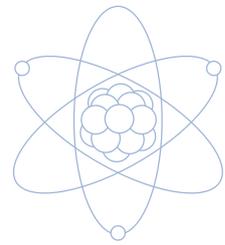
# Comprendre Le Nucléaire

## AVANT-PROPOS

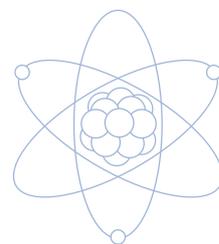
<b>INTRODUCTION</b>	<b>6</b>
LA PERCEPTION DU NUCLEAIRE	6
À QUI EST DESTINE CET OUVRAGE?	7
<b>LA RADIOACTIVITE</b>	<b>8</b>
ORIGINE DE LA RADIOACTIVITE	8
LE PHENOMENE DE LA RADIOACTIVITE	8
La demi-vie	10
Rayonnements ionisants	11
Unités de mesure: becquerel, gray et sievert	12
SOURCES D'IRRADIATIONS	12
Naturelles	12
Artificielles	14
EFFETS BIOLOGIQUES ET SANITAIRES	15
Dose équivalente	15
Débit de dose	15
Irradiation, contamination	15
Effets déterministes et stochastiques (effets aléatoires)	16
Effets somatiques et génétiques	17
EXPOSITIONS AUX RAYONNEMENTS IONISANTS	17
Normes et principes de radioprotection	17
L'exposition des travailleurs	18
L'exposition de la population	19
<b>APPLICATIONS NUCLEAIRES EN MEDECINE</b>	<b>20</b>
MEDECINE NUCLEAIRE: DIAGNOSTIC	23
In vivo	23
In vitro	26
RADIOTHERAPIE	26
La radiothérapie externe, les accélérateurs de particules	26
La radiothérapie par sources scellées implantées in-vivo dans le patient (curiethérapie)	27
La radiothérapie par sources non-scellées administrées in-vivo (radiothérapie métabolique)	28
<b>APPLICATIONS</b>	<b>30</b>
RADIOSTERILISATION DANS DIVERS SECTEURS	30
DOMESTIQUE	30
SCIENCES DE LA TERRE	30
INDUSTRIE	31
<b>PRODUCTION D'ELECTRICITE</b>	<b>34</b>
DE L'ENERGIE DE FISSION ET DES REACTIONS EN CHAINE...	34



... A LA PRODUCTION D'ELECTRICITE .....	35
PWR: LA FILIERE LA PLUS IMPORTANTE .....	36
L'HISTOIRE NUCLEAIRE BELGE .....	37
LE ROLE DU NUCLEAIRE EN BELGIQUE .....	41
Approvisionnement énergétique .....	41
Economie de combustibles fossiles .....	42
Environnemental .....	44
Economique .....	45
L'AVENIR .....	46
A moyen terme, la Génération 2015 .....	46
A long terme, la Génération 2035 multi-usages .....	47
A très long terme, la fusion thermonucléaire contrôlée ? .....	48
LE DEMANTELEMENT DES CENTRALES NUCLEAIRES .....	50
<b>LE CYCLE DU COMBUSTIBLE .....</b>	<b>52</b>
L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE .....	54
FISSION DANS LE REACTEUR .....	56
L'AVAL DU CYCLE COMBUSTIBLE .....	57
Stockage temporaire des éléments combustibles .....	57
Cycle fermé: le recyclage .....	58
Cycle ouvert: l'évacuation .....	60
<b>SURETE .....</b>	<b>62</b>
PRINCIPES FONDAMENTAUX .....	62
Défense en profondeur .....	62
Plusieurs barrières .....	62
Maîtrise des fonctions de sûreté .....	63
L'analyse de sûreté .....	64
REGLEMENTATION ET ACTEURS .....	65
Au niveau de l'exploitant .....	65
L'Agence Fédérale de Contrôle Nucléaire et les organismes agréés .....	65
Au niveau international .....	66
SURETE DANS LES CENTRALES BELGES .....	68
PLAN D'URGENCE .....	68
Cadre légal .....	68
Situations nécessitant une intervention d'urgence .....	69
Motifs de santé justifiant une action protectrice à la suite d'un accident .....	70
Principes régissant l'intervention .....	70
L'ECHELLE INES .....	71
TRAITE DE NON-PROLIFERATION .....	72



<b>LES ACCIDENTS</b> .....	<b>72</b>
Les principaux .....	72
Responsabilité civile et assurance couverture des centrales nucléaires .....	74
<b>LE NUCLEAIRE ET L'ENVIRONNEMENT</b> .....	<b>76</b>
LES GAZ A EFFET DE SERRE LIES A LA PRODUCTION D'ELECTRICITE .....	76
LES EFFLUENTS .....	78
SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT .....	79
Les réseaux automatiques d'alerte radiologique .....	79
La surveillance et le contrôle de la radioactivité du territoire .....	80
Le suivi radioécologique .....	80
Conclusions .....	80
LES DECHETS NUCLEAIRES .....	81
L'ONDRAF gère, les producteurs financent .....	81
Trois catégories .....	82
Une gestion responsable des déchets radioactifs .....	82
Volume de déchets nucléaires .....	86
Et la transmutation ? .....	87
<b>CONCLUSION : NUCLEAIRE</b> .....	<b>88</b>
<b>ANNEXES</b> .....	<b>90</b>
GLOSSAIRE DES TERMES UTILISES .....	90
CHRONOLOGIE DES EVENEMENTS QUI ONT MARQUE L'HISTOIRE DE L'ATOME .....	92
LISTE D'ADRESSES UTILES .....	94



Ce document résulte d'un constat simple: l'absence d'information sur le nucléaire, large et compréhensible par un grand nombre. Il a pour objectif principal d'aider le lecteur à comprendre un sujet qui, même si nous n'en sommes pas toujours conscients, nous concerne tous et qui est difficile à aborder sans un minimum de connaissances.

Par "nucléaire", nous entendons avant tout la science qui s'attache à l'étude du noyau de l'atome et des particules élémentaires et rayonnements associés, mais c'est aussi l'ensemble des techniques et applications que cette science a permis de développer dans de nombreux domaines, qu'ils soient énergétique, industriel, médical ou liés à la surveillance de l'environnement.

Aborder le nucléaire, c'est d'abord approcher un sujet auquel est associé une forte charge émotionnelle, liée principalement à l'histoire de la 2<sup>ème</sup> guerre mondiale et à l'accident de Tchernobyl. C'est aussi toucher à un symbole de la science, qui a fait des progrès énormes en un temps très court, rendant son acceptabilité délicate. C'est enfin faire face à la complexité et la haute technicité du sujet qui ne sont pas de nature à le rendre attrayant.

La Belgian Nuclear Society (BNS), qui rassemble à titre individuel tous ceux qui, en Belgique, ont une formation avancée touchant à la science nucléaire et qui s'intéressent à ses développements, est sensible à ces aspects. La BNS s'attache particulièrement à suivre et à faire connaître les applications nucléaires pacifiques et utiles au progrès de la Société. Elle considère comme une priorité dans sa mission tant l'étude des aspects techniques et sociologiques liés à cette activité que l'information objective des pouvoirs responsables et, plus largement, de l'ensemble de la population. Nous espérons que cet ouvrage constituera un outil de base important de vulgarisation et de diffusion de l'information. Ce document peut être lu dans son ensemble ou par chapitre.

Au début des années 90, la BNS avait mis à la disposition du public le livre "Un demi-siècle de nucléaire en Belgique", qui a été complété début 2008 par le livre "Histoire du nucléaire en Belgique, 1990-2005". Peu après la parution du premier livre à l'initiative de Léon Baetslé, un groupe de travail était créé au sein de la BNS pour entamer la rédaction d'un ouvrage de référence reprenant l'ensemble des connaissances que ses membres partagent, essentiellement de par leur expérience professionnelle. L'ambition était grande, mais la tâche s'est rapidement avérée démesurée. Aussi, un autre groupe de travail a été constitué par la suite, pour lequel la BNS a fait appel à des compétences du Forum Nucléaire Belge. Cela favorisa la complémentarité des compétences, d'un point de vue scientifique (énergétique, industrielle et médicale) bien sûr mais aussi des aptitudes (technique, sociologique et de communication) requises. Le groupe était constitué de Frank Deconinck, Henri Bonet, Robert Leclère, Luc Frankignoulle et Antoine Debauche. Ce groupe de travail s'est attaché à élaborer un document de synthèse et de mise à jour des informations précédemment rassemblées, touchant à tous les aspects du nucléaire civil.

Sans pouvoir les citer tous, nous remercions très chaleureusement les dizaines d'experts qui ont contribué, directement ou non, à la réalisation de cet ouvrage.

Nous tenons également à remercier d'avance le lecteur qui, nous l'espérons, contribuera à l'amélioration d'une prochaine édition par ses remarques. En effet, nous concevons ce document comme le germe d'un ouvrage "électronique" de référence qui pourra évoluer de façon dynamique avec l'état de la technologie et des connaissances. Comme éditeurs, nous nous engageons à corriger les erreurs factuelles et à inclure les améliorations proposées via l'adresse [SSB@bnsorg.be](mailto:SSB@bnsorg.be).

Au nom du groupe,

Jean Van Vyve

Président de la BNS



# Introduction

Depuis le début du XX<sup>ème</sup>, les scientifiques ont fait d'impressionnantes découvertes concernant la radioactivité. L'approfondissement des connaissances du nucléaire a permis l'accroissement spectaculaire de la technologie de production d'électricité, de la fabrication d'isotopes à buts médicaux et industriels, de notre compréhension des phénomènes radioactifs qui baignent l'univers et de leur impact sur la biosphère et l'homme.

## LA PERCEPTION DU NUCLÉAIRE

Le nucléaire n'est pas nécessairement bien perçu par le grand public, même si cette notion (de perception) est toute relative et en évolution perpétuelle. Il est vrai que la complexité du sujet a joué un rôle important dans ce constat. Cependant, bien que la diffusion d'informations pertinentes soit essentielle, elle ne suffit pas à elle seule. Une information peut vite s'avérer offensante si elle implique que l'audience doit recevoir cette information en toute confiance et se dire que ses craintes ne sont dues qu'à son ignorance...

Pour l'énergie nucléaire, comme pour un certain nombre d'autres techniques, la plupart des craintes proviennent de la manière dont le public perçoit les risques en jeu. De nombreux facteurs influencent la manière dont les risques sont perçus. En premier lieu, la perception n'est pas la même selon que le risque est librement choisi ou imposé. Des risques choisis, par exemple ceux liés à la conduite d'une voiture, sont beaucoup plus facilement acceptés que ceux que l'on estime imposés; c'est le cas de l'énergie nucléaire. En deuxième lieu viennent les avantages perçus, qui contrebalancent le risque. Dans le cas de l'énergie nucléaire, les avantages sont diffus et jugés atteignables par d'autres moyens. Souvent, les risques attribués au nucléaire semblent plus immédiats et considérables que ses avantages. Lorsque les besoins et les avantages sont clairement établis ou lorsque les installations nucléaires sont familières et considérées comme bien gérées, les risques tendent à être mieux acceptés. Parmi les autres facteurs qui ont une incidence sur la perception des risques, citons le degré de contrôle, la connaissance de la technologie, le niveau d'incertitude ou de controverse pesant sur une question, la peur des conséquences, le pouvoir et les intérêts perçus,

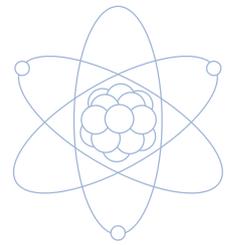
la confiance dans les institutions, les acteurs de consultation ou de prise de décisions ainsi que les idées, les valeurs et les croyances de la collectivité dans laquelle les gens vivent.

La compréhension des questions nucléaires s'inscrit donc dans un domaine bien plus vaste que celui lié aux seules réalités scientifiques. Dans bien des cas, il y a un véritable fossé entre la perception des risques par les chercheurs et les experts, d'un côté, et le public, de l'autre. Ce fossé est souvent investi, entre autres par des groupes d'intérêt spécifiques. Pour ces raisons et parce que l'énergie est un sujet qui nous concerne tous, il est important de conduire un dialogue approfondi, où les autorités ont un rôle primordial à jouer. A terme et parce que l'énergie constitue un aspect essentiel de la vie, le public doit être en mesure de comparer les multiples aspects des différentes sources d'énergie, et notamment les charges transmises aux générations futures, comme les déchets à vie longue, le changement climatique et l'épuisement des ressources.

### Quel est la perception des citoyens belges concernant la production d'électricité à partir de l'énergie nucléaire ?

Les tendances principales et récurrentes sont :

- l'énergie nucléaire, et l'énergie au sens large, n'intéresse pas le grand public, à l'exception des aspects qui touchent directement à la vie courante, comme le prix ou la difficulté de réduire la consommation d'énergie



- entre deux franges du public, représentant chacune environ 20 % de la population totale, respectivement des fervents défenseurs et des opposants de l'énergie nucléaire, plus de 50 % de la population n'a pas vraiment d'avis et son opinion varie (favorablement depuis 2002) au gré des événements
- il existe une méconnaissance profonde concernant
  - certaines réalités énergétiques: plus de la moitié de la population pense que le nucléaire en Belgique peut être remplacé par des énergies renouvelables, plus de 40 % de la population pense que l'arrêt du nucléaire entraînera une amélioration en ce qui concerne le réchauffement climatique
  - la radioactivité: 75 % de la population n'est pas au fait que la radioactivité décroît dans le temps, plus de 40 % pense que la radioactivité s'infiltrerait à travers les conteneurs qui permettent de transporter les matières radioactives
  - les déchets radioactifs: à peine plus de 5 % de la population connaît l'existence des différents types de déchets, plus de 70 % ne savent absolument pas comment ils sont gérés
- les avis relatifs à la sûreté nucléaire sont très tranchés: environ 60 % des personnes pensent qu'un accident important peut survenir dans une centrale nucléaire occidentale, contre 40 % qui pense que le risque est faible ou inexistant; la population estime que le nucléaire, l'industrie chimique et le transport routier présentent à peu près le même risque d'accident grave (il y a cinq ans, le "risque" nucléaire était placé largement au-dessus des deux autres).

## À QUI EST DESTINÉ CET OUVRAGE?

L'ouvrage propose au lecteur, dans un style simple et concis, une large gamme d'informations concrètes sur les principales applications nucléaires pacifiques dans le monde actuel. Aucun aspect – même sensible – n'a volontairement été écarté.

Cet ouvrage veut d'abord répondre à une demande importante provenant de professeurs, d'étudiants, de représentants politiques ou d'associations. Le "niveau" correspond à celui d'une première année d'études supérieures. Plus largement, à une époque où de nombreux secteurs d'activité économique de la société se préoccupent de l'avenir énergétique et du rôle que l'énergie nucléaire serait amenée à y jouer, cette nouvelle publication est destinée à tous ceux qui portent intérêt ou ont besoin de mieux saisir les défis et les perspectives relatifs à cette énergie.

### REMARQUE

Ce document se veut avant tout un ouvrage de vulgarisation, c'est pourquoi certaines simplifications ont été réalisées.

# 2

# La radioactivité

Phénomène naturel, la radioactivité est au cœur du nucléaire, elle est à l'origine de l'univers et elle le baigne depuis sa naissance. Découverte à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle par le savant français Henri Becquerel, elle n'a depuis cessé d'être étudiée à travers le monde. C'est aujourd'hui, grâce à des méthodes de détection ultrasensibles, un des phénomènes les plus précisément connus de la science. Si elle est naturellement présente partout dans l'univers, sa maîtrise par l'homme et la découverte de la radioactivité artificielle par Irène et Frédéric Joliot-Curie en 1934 ont permis de développer une série d'applications notamment dans les domaines de la médecine et de l'industrie.

## ORIGINE DE LA RADIOACTIVITÉ

D'après l'analyse du bruit de fond cosmique, qui montre l'état de l'univers environ 380 000 ans après le Big Bang, on estime actuellement l'âge de l'univers à quelque 13,7 ( $\pm 0,2$ ) milliards d'années.

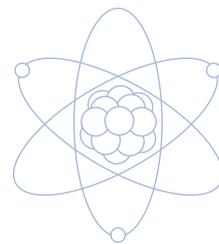
Durant le premier million d'années, les noyaux légers et les atomes allant jusqu'au béryllium sont créés. La force gravitationnelle entraîne la naissance des étoiles. La température augmente et permet le déclenchement de réactions de fusion créant des éléments comme par exemple: le carbone, l'oxygène, le silicium ou le fer. Si l'étoile est assez massive ( $> 1,4$  fois la taille de notre soleil), elle finit par imploser sous l'effet de la gravitation, atteignant des températures telles que protons et électrons se recombinent en neutrons. Ceci précède une explosion qui transforme l'astre en supernova<sup>1</sup>. Le bombardement neutronique des matières éjectées crée l'ensemble des éléments du tableau de Mendeleïev, dont l'uranium, le thorium ou le potassium, que l'on trouve aujourd'hui à l'état naturel sur Terre. Ces derniers sont les "déchets radioactifs" de l'explosion de la supernova ayant donné naissance à notre planète.

Les radionucléides (ou isotope radioactif d'un élément, voir p.10), qu'ils soient d'origine naturelle ou artificielle sont une des sources de l'irradiation naturelle de l'humanité. Les radionucléides émis sous forme de gaz, de particules solides ou liquides se répartissent dans les milieux que sont les eaux, les sols et la végétation qui permettent leur transfert à l'homme de manière directe ou indirecte.

## LE PHÉNOMÈNE DE LA RADIOACTIVITÉ

La radioactivité est la propriété que possèdent les isotopes instables de certains éléments du tableau de Mendeleïev de se transformer par désintégrations en un autre atome - plus stable - par la suite d'une modification du noyau atomique, en émettant des rayonnements corpusculaires (particules alpha, bêta, etc.) ou électromagnétiques (rayons gamma). Il s'agit donc d'un phénomène purement nucléaire (lié au noyau, indépendant des électrons), spontané, aléatoire (voir p.16) et statistique. En d'autres termes, il existe des lois statistiques concernant la désintégration radioactive en tenant compte d'un grand nombre de noyaux. Les éléments radioactifs (naturels ou artificiels) sont également appelés radioéléments<sup>2</sup>.

1. *Après transformation de la matière en neutrons, ces particules engendrent une nouvelle situation qui stoppe la contraction du noyau et le rend très rigide. Mais les autres couches de l'étoile sont toujours en train de s'effondrer. Elles atteignent la surface du noyau incompressible, s'y écrasent très violemment et rebondissent. Apparaît alors une formidable onde de choc qui va s'éloigner du noyau et tout balayer sur son passage. L'enveloppe de l'étoile est complètement soufflée. Sa matière est éjectée vers le milieu interstellaire à des vitesses de plusieurs milliers de kilomètres par seconde. Du fait de l'incroyable quantité d'énergie libérée, l'étoile se met à briller comme 200 millions de soleils, parfois autant qu'une galaxie tout entière. Une supernova vient de naître.*
2. *Seul un petit nombre d'éléments radioactifs existent naturellement: il s'agit de quelques éléments lourds (thorium, uranium, radium, etc.). Il existe aussi naturellement quelques radionucléides légers (carbone 14, potassium 40). Les autres radionucléides, dont le nombre dépasse 1500, sont créés artificiellement en laboratoire ou dans des réacteurs nucléaires pour des applications médicales.*



### Protons, neutrons, électrons, isotopes

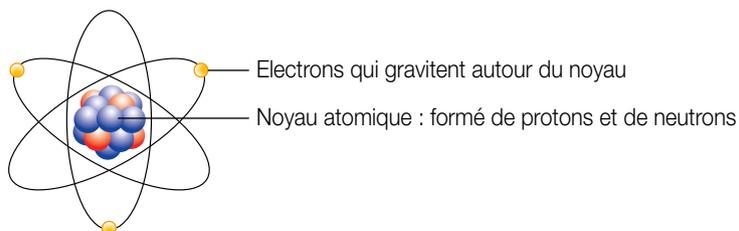
Un élément est constitué de trois types de particules : le proton, le neutron et l'électron. Un noyau atomique est formé de protons et de neutrons. Ces deux particules sont appelées nucléons. Autour du noyau gravitent les électrons. L'atome est ainsi constitué. A l'état naturel, il existe 91 atomes différents (l'élément 43, Technicium; n'existe pas à l'état naturel) qui sont repris dans le tableau de Mendeleïev, où ils se suivent du plus léger - l'hydrogène (un proton et un électron) - au plus lourd - l'uranium (92 protons et 92 électrons). Les éléments plus lourds que l'uranium sont appelés transuraniens. Ils n'existent généralement pas dans la nature. Le proton est porteur d'une charge électrique positive; l'électron, d'une charge négative. Chaque atome comporte un nombre égal de protons et d'électrons, il est électriquement neutre. L'atome est défini par le nombre de protons (Z) et le nombre de neutrons (N) qui le composent. La somme de ces deux nombres donne le nombre de masse (A). Le nombre de protons est également appelé le numéro atomique, c'est lui qui indique la place de l'élément dans le tableau de Mendeleïev :  ${}^A_Z X$  p.ex.  ${}^4_2 He$ .

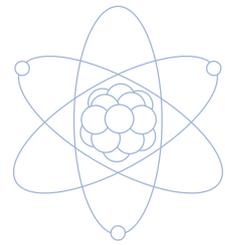
### Les isotopes sont des éléments qui ont un numéro atomique identique et un nombre de neutrons différents.

Par exemple, les isotopes de l'hydrogène sont l'hydrogène (1 proton et 0 neutron), le deutérium (1 proton et 1 neutron) et le tritium (1 proton et 2 neutrons). Les deux isotopes les plus courants de l'uranium sont l'uranium 235 ( ${}^{235}_{92}U$ , 92 protons et 143 neutrons) et l'uranium 238 ( ${}^{238}_{92}U$ , 92 protons et 146 neutrons). Les atomes se combinent entre eux pour former des molécules. Une molécule d'eau (H<sub>2</sub>O) est ainsi composée d'un atome d'oxygène  ${}^{16}_8O$  et de deux atomes d'hydrogène  ${}^1_1H$ . Ces combinaisons d'atomes impliquent les structures électroniques et intéressent la chimie.

### La physique nucléaire concerne l'étude des noyaux atomiques.

## Schéma d'un noyau atomique



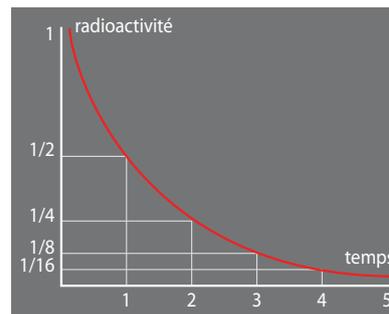


## La demi-vie

La plupart des atomes existant sur terre sont stables. D'autres sont instables et se transforment par le phénomène de la radioactivité au cours du temps afin d'atteindre un état stable. **Ces atomes radioactifs se désintègrent spontanément** en émettant des rayonnements ionisants **et disparaissent ainsi plus ou moins vite** selon un temps caractéristique pour chaque isotope spécifique. Cette demi-vie, qui constitue une référence, correspond au temps nécessaire pour que la moitié des atomes radioactifs présents initialement se désintègrent.

La demi-vie peut varier de quelques fractions de seconde à plusieurs milliards d'années. Plus elle est courte, plus l'isotope est instable, plus il y a de désintégrations et plus vite l'isotope se transformera en un autre ou deviendra stable. A l'inverse, plus elle est longue, moins l'isotope est radioactif car il **est presque stable**. La décroissance de la radioactivité est systématique (diminution de moitié à chaque période). Ainsi au bout de dix périodes, l'activité initiale est mille fois moindre (1024 fois ou  $2^{10}$ ). Si l'on considère que les substances radioactives sont nocifs, ils le sont de moins en moins au fil du temps, ce qui n'est pas le cas des substances chimiques.

## Décroissance radioactive



- La radioactivité d'une substance décroît avec le temps
- Demi-vie = intervalle dans lequel une substance perd la moitié de sa radioactivité
- La demi-vie diffère selon les substances (de quelques secondes à plusieurs millions d'années)

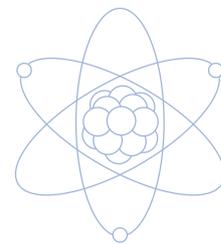
La radioactivité décroît selon la loi suivante :

$$A = A_0 \cdot e^{\frac{-0,693}{\tau} \cdot t} \text{ avec}$$

- $A$  = radioactivité au temps  $t$  (en Becquerel, voir p.12)
- $A_0$  = radioactivité initiale de la source
- $t$  = durée (unité de temps)
- $\tau$  = demi-vie de l'isotope

### Demi-vies de quelques radio-isotopes (N = Naturel; A = Artificiel)

Oxygène 15 (A)	124 secondes
Technicium 99m (A)	6 heures
Radon 222 (N)	3,8 jours
Iode 131 (A)	8 jours
Iridium 192 (A)	74 jours
Cobalt 60 (A)	5,3 ans
Césium 137 (A)	30 ans
Américium 241 (A)	432 ans
Radium 226 (A)	1600 ans
Carbone 14 (N et A)	5730 ans
Plutonium 239 (A)	24.100 ans
Uranium 235 (N)	700 millions d'années
Uranium 238 (N)	4,5 milliards d'années
Thorium 232 (N)	14 milliards d'années



## Rayonnements ionisants

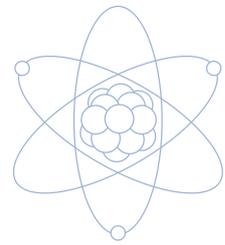
Outre sa demi-vie, un isotope radioactif est caractérisé par la nature des rayonnements qu'il émet. Les rayonnements sont dits ionisants car ils sont capables d'ioniser la matière en interagissant avec la couche électronique des atomes. Si un électron est expulsé, l'atome se charge positivement et devient un ion. L'atome ionisé devient chimiquement réactif. Si la réaction chimique intervient dans une cellule vivante, elle peut entraîner des lésions et des effets biologiques néfastes. Ces derniers effets dépendent de plusieurs facteurs : le type de rayonnement, son intensité, sa localisation, sa durée, etc.

### Les principaux types de rayonnements sont :

- Les rayons **alpha** sont peu pénétrants, de charge positive mais fortement ionisant. Ce sont des noyaux d'hélium (2 protons et 2 neutrons). Ces particules lourdes parcourent quelques centimètres dans l'air, quelques millièmes de millimètres dans l'eau et sont arrêtées par une simple feuille de papier.
- Les rayons **bêta<sup>-</sup>** plus pénétrants sont de charge négative, ce sont des électrons. Ils sont arrêtés par une feuille d'aluminium de quelques millimètres d'épaisseur.
- Les rayons **bêta<sup>+</sup>** sont identiques aux bêta<sup>-</sup> mais dus à des électrons chargés positivement (positrons) qui sont les antiparticules des électrons. Ils sont principalement produits par les rayonnements cosmiques et pour des accélérateurs de particules.
- Les rayons **gamma**, de nature électromagnétique, sont dépourvus de charge et peuvent être extrêmement pénétrants. Il s'agit de photons. Ils peuvent traverser des épaisseurs variables de plomb et de béton.
- Les rayons **X** sont de même nature que les rayons gamma (électromagnétiques) et proviennent le plus souvent du cortège électronique des atomes; ils peuvent traverser des épaisseurs variables de matière.
- Les **neutrons** sont des particules neutres, lourdes et très pénétrantes car non chargées; elles peuvent pénétrer facilement les noyaux des atomes qu'elles rencontrent et les rendre eux-même radioactifs.

## Plusieurs types de rayonnements

type	Composition/charge	arrêté par
$\alpha$	 noyaux d'hélium ++	 feuille de papier couche d'air : 3 cm
$\beta^{\pm}$	 électrons, positrons - +	 plaque aluminium : < 1 cm couche d'air : 3 m
$\gamma, X$	 ondes ionisantes non chargé	 fer, béton, plomb : 1 m couche d'eau : 3 m
$n$	 non chargé	 béton, eau : épaisseur importante



## Unités de mesure : becquerel, gray et sievert

(voir aussi annexes)

- Le becquerel (Bq) mesure la radioactivité. C'est l'unité d'activité qui correspond à la désintégration d'un noyau par seconde. L'activité d'une substance représente le nombre d'atomes radioactifs qui se désintègrent pendant une unité de temps.
- Le gray (Gy) mesure la quantité d'énergie ou dose absorbée par une matière exposée à un rayonnement. Le gray correspond à une absorption d'énergie d'un joule par kilogramme de matière.
- Le sievert (Sv) mesure la dose équivalente (p. 15), c-à-d les effets biologiques de la radioactivité. Ces effets dépendent du débit de dose ainsi que de la nature et de l'énergie du rayonnement. L'équivalent de dose correspond à la dose absorbée multipliée par un coefficient (facteur de qualité) qui tient compte de la nature du rayonnement (voir p.15).

Ces trois unités sont les unités légales de mesure utilisées en radioprotection.

Les rapports existant entre les différentes unités de mesure peuvent être imaginés de la façon suivante :

- Les becquerels ? Ce sont les cailloux qu'un enfant jette en l'air.
- Les grays ? Ce sont les cailloux que reçoit son camarade situé à côté.
- Les sieverts ? Ce sont les plaies plus ou moins graves qui en résultent.

## SOURCES D'IRRADIATIONS

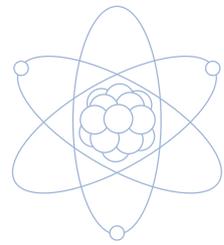
### Il y a deux sources d'irradiations : les naturelles et les artificielles

#### Les sources naturelles

La radioactivité naturelle a une double origine : cosmique et terrestre.

**Les rayonnements cosmiques** sont des rayonnements de haute énergie qui proviennent de l'espace extraterrestre. Depuis des milliards d'années, ils bombardent notre planète en permanence. En moyenne, deux particules par seconde traversent la page que vous êtes en train de lire. Ces rayons peuvent provoquer des modifications électriques dans tout ce qu'ils traversent et constituent donc une forme de rayonnement ionisant. L'atmosphère en absorbant un grand nombre, l'exposition aux rayons cosmiques est plus importante en altitude. Au niveau de la mer, elle est de l'ordre de 0,3 millisievert (mSv) par an par individu ; à 12 000 mètres, elle atteint en moyenne 40 millisieverts par an. L'équivalent de dose reçu au cours d'un vol transatlantique est de l'ordre de 0,05 millisievert (soit cinq fois plus que l'équivalent dose annuel reçu à proximité d'une centrale nucléaire). Les personnels navigants de compagnies aériennes ainsi que certains grands voyageurs sont exposés à des doses pouvant dépasser 1 mSv/an. On estime ainsi que la dose annuelle moyenne pour des personnels assurant des vols régionaux serait de 1 à 2 mSv, de 3 à 5 mSv pour les personnels de «long-courrier» et jusqu'à 10 mSv pour certains personnels de services de livraison postale.

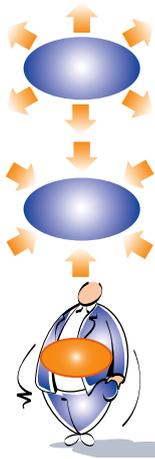
**La radioactivité contenue dans le sol** constitue l'autre source d'origine naturelle. Ils dépendent de la nature des sols et les équivalents de dose annuelle varient fortement d'une région à l'autre. Les doses enregistrées sont ainsi plus élevées dans les régions granitiques, riches en uranium et en thorium. C'est notamment le cas de la Bretagne, du Massif central ou encore des Ardennes où l'on note les plus fortes concentrations de radon.



## La radioactivité

L'eau douce contient en moyenne 0,37 Bq/l et l'eau de mer 13 Bq/l. Certaines eaux minérales ont une radioactivité plus élevée.

Une part de radioactivité émane de chacun d'entre-nous. **L'homme est naturellement radioactif.** Notre organisme compte environ 4 500 Bq de potassium 40, 3 700 Bq de carbone 14 et 13 Bq de radium 226.



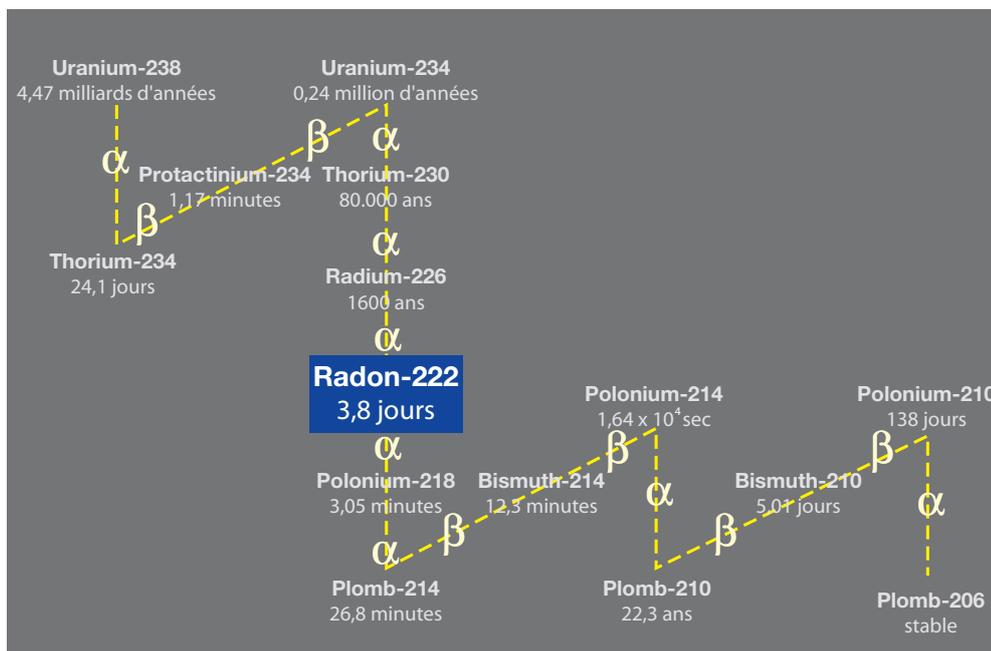
- 1** Rayonnement radioactif  
**Becquerel (Bq)** = 1 désintégration par seconde
- 2** Absorption des radiations  
**Gray (Gy)** = 1 J d'énergie absorbée par kg
- 3** Effet des radiations  
**Sievert (Sv)** = mesure des effets sur l'homme

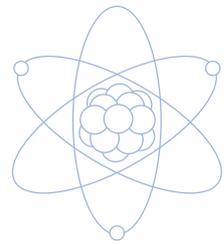
### Le cas du radon

Le radon est un gaz radioactif incolore, inodore et insipide. Il est issu de la désintégration de l'uranium, du radium et du thorium présents dans la nature. Il ne présente un danger qu'à partir d'une certaine concentration et dans certaines conditions.

Le plus important, le radon 222 provient de la décroissance radioactive du radium 226 - sa demi-vie est de 3,82 jours - il décroît en plusieurs éléments solides émetteurs de rayons alpha: polonium 218, polonium 214, bismuth 214 et plomb 214. Tous ces éléments sont des radioéléments naturels qu'on retrouve en quantité variable dans la croûte terrestre. Ces particules radioactives inhalées avec des poussières se fixent dans les poumons où elles irradient les tissus et peuvent à terme provoquer un cancer.

### Le cas du radon





### Les sources artificielles

En bombardant une plaque d'aluminium avec des particules alpha issues d'une source radioactive de polonium, Irène et Frédéric Joliot-Curie obtiennent du phosphore radioactif: le phosphore 30. Cet isotope du phosphore n'existe pas à l'état naturel et vient d'être pour la première fois produit artificiellement en laboratoire. Nous sommes au début de 1934. Depuis, plusieurs centaines d'isotopes ont été produits mais seulement environ une trentaine sont utilisables à des fins scientifiques et industrielles, la plupart de ces éléments radioactifs étant particulièrement instables.

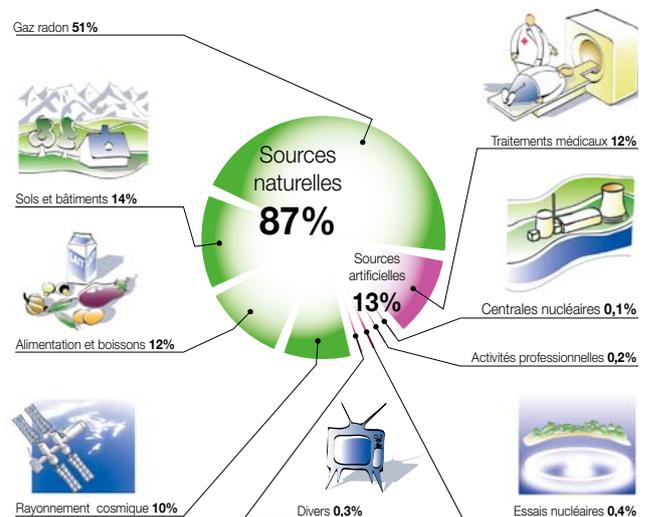
Les domaines d'activités impliquant des risques d'exposition aux rayonnements ionisants peuvent être regroupés comme suit:

- les installations nucléaires telles que les centrales nucléaires, les accélérateurs de particules, la fabrication ou la transformation de matières radioactives, etc.
- le transport des matières radioactives
- les rayonnements ionisants: qu'ils soient générés par des radionucléides ou par des appareils électriques (rayons X), ils sont utilisés dans de très nombreux domaines, dont la médecine, la biologie humaine, la recherche, l'industrie, les applications vétérinaires, médico-légales ou destinées à la conservation des denrées alimentaires
- les déchets radioactifs et les sites concernés
- les activités qui font appel à des matières (matières premières, matériaux de construction, résidus industriels) contenant des radionucléides naturels non utilisés pour leurs propriétés radioactives comme les industries d'extraction du phosphate, des pigments de coloration ou bien encore celles exploitant les minerais de terres rares dont la monazite.

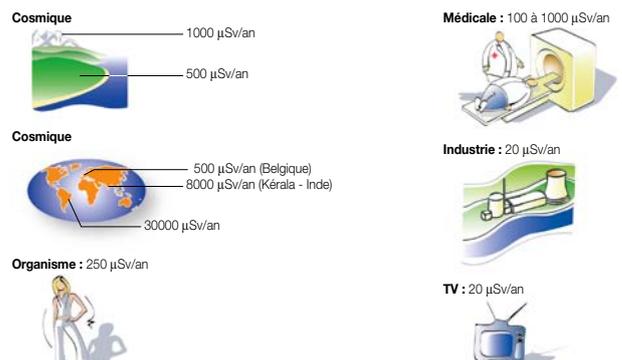
Les activités médicales représentent la quasi-totalité de l'irradiation artificielle que nous recevons durant notre vie. La découverte de la radioactivité a très vite intéressé

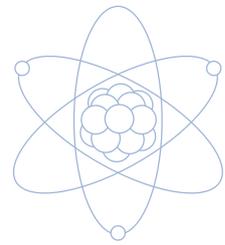
les médecins. C'est ainsi qu'est née la radiothérapie (utilisation thérapeutique des rayonnements) et plus tard le diagnostic nucléaire (utilisation de traceurs radioactifs). Une des sources principales de radioactivité artificielle provient de la radiologie. Une radiographie dentaire correspond à une dose de 0,02 millisieverts. Pour une radiographie pulmonaire ou d'un autre organe, la dose est de l'ordre de 0,05 millisieverts. En ce qui concerne l'utilisation des rayons à des fins de diagnostic (scan du corps entier, scintigraphies thyroïdiennes, etc.), les irradiations montent à quelques millisieverts par examen. Les doses reçues par le patient sont généralement négligeables en comparaison des bénéfices qu'il peut en tirer. Plus de la moitié des

### Sources de radioactivité naturelles et artificielles



### Quelques exemples de doses annuelles





radiographies effectuées le sont dans le cadre de soins dentaires.

La part de l'activité industrielle (en ce compris la production d'électricité à partir de réacteurs nucléaires) est minime. En fonctionnement nominal, une centrale nucléaire représente une dose de 0,01 millisieverts/an. A titre de comparaison, la dose correspondant à l'irradiation par des objets d'usage courant comme les écrans cathodiques (télévision par exemple) est de l'ordre de 0,02 millisieverts/an.

### EFFETS BIOLOGIQUES ET SANITAIRES

Les effets biologiques des rayonnements sont complexes et ont des conséquences variables et aléatoires. Ils dépendent d'une série de facteurs comme le type de rayonnement, son intensité, sa localisation, la durée d'exposition, etc. En outre, ils mettent du temps à se manifester: en cas de forte exposition, entre quelques heures et quelques semaines, en cas de faible exposition, quelques années. Et dans ce dernier cas, il est souvent difficile de relier l'apparition d'une pathologie à une cause particulière.

### Dose équivalente

La dose équivalente est une notion importante pour comprendre les effets biologiques des rayonnements ionisants. Il correspond à la dose absorbée multipliée par un coefficient tenant compte de la nature du rayonnement. Ce coefficient - appelé le facteur de qualité - est obtenu à partir de mesures expérimentales. Il est égal à un pour les rayons X, bêta et gamma; à 2,3 pour les neutrons dits "lents" (ou "thermiques"); à 10 pour les neutrons rapides et à 20 pour les rayons alpha. Ainsi, à dose absorbée égale, les effets biologiques peuvent être très différents selon le rayonnement. Un rayonnement alpha aura un effet environ 20 fois plus important que la même dose d'un rayonnement gamma. La dose équivalente est exprimée en Sv.

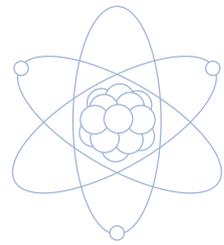
**Dose équivalente (Sv) = dose absorbée (Gray) x facteur de qualité**

### Débit de dose

Un facteur important à considérer afin de déterminer les effets d'une irradiation - notamment en radiothérapie - est le débit de dose. « Un baba au rhum par jour est parfaitement bien toléré, mais la même quantité d'alcool (sur plusieurs semaines par exemple) ingérée en quelques minutes provoquerait un coma alcoolique ». De même, l'efficacité biologique d'une irradiation varie selon le débit, c'est-à-dire la dose administrée par unité de temps, et est moindre si le débit de dose est plus faible. Or, celui-ci varie très largement, il est de l'ordre du Sv par minute en radiothérapie, du microSv (millionième de Sv) par an pour la population autour d'une centrale nucléaire, etc. On administre, pour traiter un cancer, des doses de 40 à 80 Sv en quelques semaines au niveau de la tumeur, soit 10 à 20 fois plus que la dose létale 50 (50% de chances de survie) en irradiation globale. La dose n'a donc de sens que si l'on précise le volume du corps irradié et la durée de l'irradiation.

### Irradiation, contamination

L'exposition aux rayonnements peut se faire de deux façons: **l'irradiation et la contamination**. Dans le premier cas, l'organisme est soumis à une source de rayonnements qui souvent lui est extérieure (rayons cosmiques, rayons X, etc.). Toutefois, elle peut aussi être interne (à l'intérieur du corps) lorsqu'une particule radioactive est absorbée par l'organisme. Dans le second cas, des particules radioactives viennent se déposer sur la peau ou sur les vêtements. Ces particules peuvent également être inhalées ou ingérées. Or, si ces dernières émettent un rayonnement alpha, qu'une simple feuille de papier arrête, elles sont particulièrement dangereuses lorsqu'elles sont inhalées et sont directement au contact de certains organes comme les poumons. **L'irradiation est comparable au rayonnement solaire; afin de s'en protéger, on se met à l'ombre ou on ouvre son parasol. La contamination est comparable à la pluie; afin de s'en protéger, il convient de s'habiller avec des vêtements imperméables.**



## Effets déterministes et stochastiques (effets aléatoires)

Qu'ils soient le fait de particules chargées, par exemple un électron (rayonnement bêta) ou un noyau d'hélium (rayonnement alpha), ou de photons du rayonnement électromagnétique (rayons X ou rayons gamma), les rayonnements ionisants interagissent avec les atomes et les molécules constitutives des cellules de la matière vivante et les transforment chimiquement.

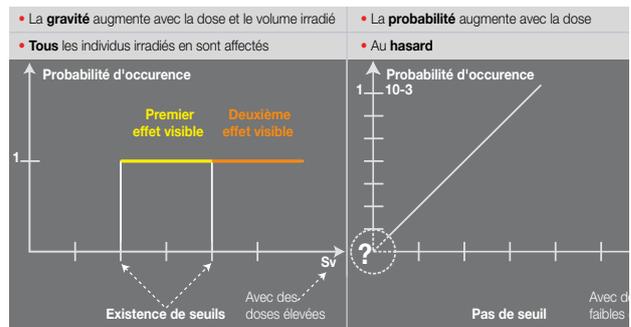
Parmi les lésions ainsi créées, les plus importantes concernent l'ADN des cellules; elles ne sont pas fondamentalement différentes de celles provoquées par les substances chimiques issues du métabolisme cellulaire. Lorsqu'elles ne sont pas réparées par les cellules elles-mêmes, ces lésions peuvent conduire à la mort cellulaire et à l'apparition d'effets sur la santé dès lors que le tissu ne peut plus assurer ses fonctions.

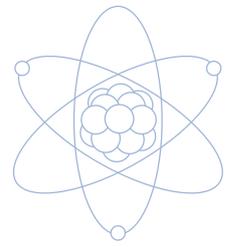
Ces **effets déterministes** sont connus de longue date puisque les premiers effets ont été observés dès la découverte des rayons X par Röntgen à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Ils sont non aléatoires, apparaissent à court terme et automatiquement à partir d'une dose seuil au-dessus de laquelle des lésions se développent. Il s'agit très clairement de **fortes doses**. Selon leur importance, les conséquences sur l'homme varient énormément. Les premières lésions provoquées dans les tissus par les rayonnements ionisants sont "proportionnelles" à la dose absorbée. Lorsqu'elle est supérieure à 0,5 Sv, des effets se manifestent dans un délai qui varie de quelques heures à quelques semaines. Pour des doses comprises entre 1 et 4 Sv, on observe des nausées et des vomissements. En ce qui concerne des doses supérieures à 4 Sv, les perturbations biologiques sont beaucoup plus importantes et peuvent être mortelles.

## Quelques ordres de grandeurs

Equivalent dose	Effets
$d < 0,1 \text{ Sv}$	Aucun trouble à court terme sur la santé
$0,5 \text{ Sv} < d < 2 \text{ Sv}$	Malaises, nausées, vomissements, etc.; rétablissement rapide
$2 \text{ Sv} < d < 4 \text{ Sv}$	Signes cutanés (rougeurs peau, perte de cheveux)
$4 \text{ Sv} < d < 6 \text{ Sv}$	50% de chances de survie, greffes de moelle pour augmenter les chances de survie
$6 \text{ Sv} < d < 10 \text{ Sv}$	10% de chances de survie
$d > 10 \text{ Sv}$	Pronostic fatal (quelques heures à quelques semaines)

Les **effets stochastiques**, appelés aussi probabilistes sont aléatoires et n'apparaissent pas nécessairement. Ils sont statistiquement liés à la dose. En d'autres termes, une augmentation de celle-ci entraîne une augmentation de la probabilité de l'effet. Ces effets peuvent se manifester plusieurs années après l'exposition aux rayonnements et peuvent provoquer un léger accroissement de la fréquence des maladies déjà existantes. En règle générale, il est particulièrement difficile de noter les éventuels effets de (très) **faibles doses**.





Ceci est comparable à l'utilisation de téléphones portables, nous "baignons" en permanence dans de faibles champs électromagnétiques et il est quasi impossible, au jour d'aujourd'hui, de mesurer l'effet sur l'être humain, s'il existe. Les multiples études épidémiologiques effectuées ne permettent pas de dégager une tendance claire et unanimement partagée. En outre, ces effets varient selon la catégorie de population affectée. Certaines personnes sont plus sensibles aux rayonnements que d'autres. C'est notamment le cas des enfants confrontés à l'iode radioactif et qui sont davantage susceptibles de développer un cancer de la thyroïde que les adultes.

### Effets somatiques et génétiques

Ces effets déterministes et stochastiques sont somatiques lorsqu'ils se manifestent sur le corps de la personne ou de l'animal irradié. Lorsque ces effets se manifestent dans l'organisme des descendants d'individus irradiés, on parlera d'effets génétiques. Ces derniers sont par nature aléatoires et ne concernent parfois que la deuxième ou troisième génération. Ils touchent les cellules germinales (cellules de la reproduction). Si le lien a pu être établi expérimentalement entre les radiations ionisantes et les mutations génétiquement transmissibles pour certaines races d'animaux, ce lien n'a jamais pu être mis en évidence chez l'Homme.

## EXPOSITIONS AUX RAYONNEMENTS IONISANTS

### Normes et principes de radioprotection

#### Pourquoi des limites de doses ?

Un avion à réaction qui décolle, une cheminée d'usine qui fume créent des nuisances pour l'homme et son environnement. De même, l'ouvrier du bâtiment qui se sert d'un marteau-piqueur, ou le chimiste qui manipule des solvants organiques sont, eux aussi, soumis à des effets nuisibles à la santé, créés par leur activité professionnelle. Chacun d'entre nous est, en permanence, agressé par les

bruits, les vibrations, les fumées, les vapeurs toxiques, etc., dont l'effet sur notre santé peut varier du négligeable à l'insupportable, aller jusqu'au dangereux, voire au mortel.

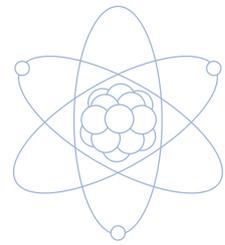
D'une façon générale, pour éviter l'apparition d'effets sur la santé, les dispositions de sécurité s'appuient sur des limites à respecter qui sont établies après analyse des résultats issus, soit d'études épidémiologiques sur l'homme, soit d'expérimentations sur l'animal. Il en est de même dans le domaine radiologique, pour lequel sont établies des limites à respecter pour les doses de rayonnements externes, ou pour des quantités de substances radioactives incorporées par les individus, c'est-à-dire susceptibles d'être inhalées ou ingérées. En pratique, la limite de doses est donc le niveau de la nuisance, qui ne doit pas être dépassé, afin qu'une activité puisse être exercée de façon routinière, sans faire courir un risque inacceptable pour l'homme.

#### Principes fondamentaux du système de limitation des doses

La Commission Internationale de Protection Radiologique (C.I.P.R.) recommande le système de limitation de doses suivant :

- aucune pratique ne doit être adoptée si son introduction n'entraîne pas un bénéfice net;
- toutes les expositions doivent être maintenues au niveau le plus bas que l'on peut raisonnablement atteindre, compte tenu des facteurs économiques et sociaux (principe ALARA, As Low As Reasonably Achievable).
- l'équivalent de dose pour les individus ne doit pas dépasser les limites recommandées pour les circonstances en question.

Ces trois composantes correspondent respectivement aux principes de la justification des opérations, de l'optimisation de la protection et de la limitation des expositions individuelles.



### Du principe ALARA au principe de précaution

Si les effets de fortes doses sont connus, ceux qui concernent les faibles doses, en revanche, sont sujets à controverse. Certains pensent que tout rayonnement ionisant est potentiellement nocif, quelle que soit son intensité. Il est important de rappeler que dans de nombreuses régions du monde, comme le Kerala en Inde, la radioactivité naturelle est de 10 à 50 fois plus élevée que chez nous et que l'on n'a pas observé de détriments néfastes perceptibles sur la population de ces régions. D'autres, en revanche, estiment qu'il existe un seuil au-dessous duquel les effets sont nuls, voire "bénéfiques". Il est vrai que l'on a observé certains effets "bénéfiques" de faibles doses, notamment sur la stimulation de la croissance cellulaire chez certaines plantes.

Une large part de la méconnaissance des effets des faibles doses ne provient pas des spécialistes de la radioactivité qui sont à même de mesurer les doses avec une extrême précision mais des biologistes qui n'ont encore qu'une connaissance partielle des mécanismes qui régissent la génétique (on ignore actuellement encore le rôle de 90% de l'ADN). En outre, il faut savoir que dans le corps humain, 60 milliards de km d'ADN subissent 10 milliards de milliards de réparations par jour: 40 millions de km d'ADN sont ainsi recréés quotidiennement (même en l'absence de toute irradiation artificielle)

En l'absence de réponses quant aux effets des faibles doses, on appliquait (et on applique) le principe ALARA (As Low As Reasonably Achievable). Son application implique la mise en œuvre systématique d'une démarche pour

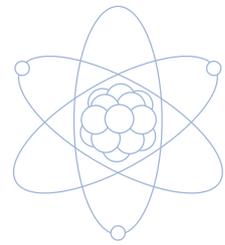
identifier, évaluer et sélectionner les actions de radioprotection les mieux à même de maintenir les expositions des intervenants et du public à un niveau aussi bas que raisonnablement possible. Au fil du temps, cette notion s'est confondue avec le principe de précaution: on applique par précaution les niveaux recommandés par la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), le but devrait être de prévenir les effets nocifs non stochastiques et de limiter la probabilité d'apparition des effets stochastiques à des niveaux jugés acceptables.

**Loin de constituer un principe d'abstention systématique**, le principe de précaution s'applique surtout dans les cas d'activités à grande échelle et/ou porteuses de risques de dommages irréversibles.

### L'exposition des travailleurs

Le système de surveillance des expositions des personnes travaillant dans les installations où sont utilisés les rayonnements ionisants a été mis en place depuis plusieurs décennies. Fondé sur le port obligatoire du dosimètre pour les travailleurs susceptibles d'être exposés, il permet de vérifier le respect des limites réglementaires applicables aux travailleurs; les données enregistrées permettent de connaître la dose d'exposition cumulée sur une période déterminée.

Le niveau de risque représentatif d'une profession dite sûre est le risque moyen pour tous les travailleurs dans cette branche, le risque individuel variant avec leur tâche et sa distribution tournant autour de cette moyenne. **Les limites d'équivalent de dose ont pour but d'assurer une protection adéquate des individus les plus exposés.**



Préconisées par la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), les limites de dose s'appliquent aux **sources externes** de rayonnement et aux **contaminations internes** résultant de l'incorporation de substances radioactives. Ces limites de doses concernent les deux catégories d'effets.

Ainsi pour l'organisme entier, exposé de façon uniforme, une directive européenne fixe la limite à 100 mSv/5 ans consécutifs glissants pour les effets stochastiques. Dans le cas d'expositions partielles de l'organisme (organes et tissus pris séparément -> peau, poumons, thyroïde, os, etc.), elle est de 1000 mSv/5 ans consécutifs glissants. La Belgique a fixé une limite de 20 mSv/12 mois consécutifs glissants pour l'organisme entier et 500 mSv/12 mois consécutifs glissants dans le cas d'expositions partielles. Quant aux travailleurs des centrales nucléaires belges et d'autres industries, les objectifs fixés sont bien en deçà des prescriptions belges; ils se situent à **10 mSv/12 mois consécutifs glissants pour l'organisme entier** et 100 mSv/12 mois consécutifs glissants dans le cas d'expositions partielles. Pratiquement, les mesures de doses effectuées par le personnel concerné montrent que l'exposition de ces travailleurs reste bien inférieure aux limites que s'imposent les exploitants.

### L'exposition de la population

Les risques dus aux rayonnements ne représentent qu'une très faible fraction de l'ensemble des dangers inhérents à l'environnement.

Pour établir les limites de doses pour le public, la Commission Internationale de Protection Radiologique a pris en considération les risques encourus dans la vie de tous les jours.

En prenant comme exemple les transports en commun, dont les conditions de sécurité sont étroitement réglementées par les pouvoirs publics, et considérées généralement comme acceptables par les populations,

la Commission Internationale de Protection Radiologique a fixé, pour les personnes du public, des limites de doses bien inférieures à celles des travailleurs, soit **1 mSv par an pour l'organisme entier** et 50 mSv par an dans le cas d'expositions partielles.

### Les expositions médicales

Dans le domaine médical, les expositions des patients aux rayonnements ionisants se distinguent des autres sources d'expositions dans la mesure où elles ne font pas l'objet de limitation stricte, même si les principes de justification et d'optimisation demeurent applicables. La situation est d'ailleurs différente selon que l'on considère le domaine des applications diagnostiques (radiologie, médecine nucléaire diagnostique) ou celui de la radiothérapie, externe ou interne: dans le premier cas, il est nécessaire d'optimiser en recherchant la dose minimale permettant l'obtention d'une information pertinente; dans le second cas, il faut délivrer la dose nécessaire pour détruire la tumeur tout en préservant au maximum les tissus sains voisins. La dose pour le patient dépend de la qualité du matériel utilisé, ce qui justifie pleinement un contrôle de qualité des dispositifs médicaux utilisés, non seulement le matériel irradiant mais aussi celui qui est utilisé pour ces expositions (si l'appareil - négatoscope - permettant de visualiser un cliché de radiologie est défaillant, cela peut entraîner une augmentation des doses délivrées pour réaliser ces clichés). La dose dépend aussi de la nature des actes et de l'émission du rayonnement (tube à rayons X, accélérateur de particules, radionucléides en source non scellée, etc.).

# 3

## Applications nucléaires en médecine

Quelques mois après la découverte des rayons X par Röntgen, une autre découverte retentissante fut celle de la radioactivité par Becquerel et Curie, avec comme corollaire celle du **diagnostic** et de la **thérapie par rayonnements ionisants**.

La main du Dr. von Kollikers, ami de Roentgen, et deuxième radiographie connue



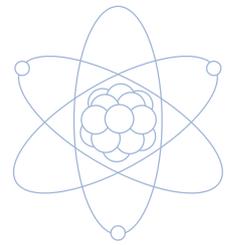
Outre le **radiodiagnostic** (qui utilise des rayons X produits par des générateurs électriques), la **médecine nucléaire** fait usage de **radioéléments**, en sources scellées, ou non (la radiographie ne fait donc pas, en ce sens, partie de la médecine nucléaire); dans ce dernier cas, l'association d'un radioélément à des produits pharmaceutiques **combine les avantages de la chimie**

(qui permet de diriger l'isotope radioactif vers l'endroit voulu) **et de la physique nucléaire** qui fait du rayonnement émis par le radioélément, soit un signal de sa localisation (diagnostic), soit un vecteur de destruction des cellules-cibles (radiothérapie). D'autres applications médicales font appel aux développements de la physique nucléaire, faisant par exemple **usage direct de faisceaux** de protons (créés par cyclotron) ou de neutrons. Non seulement, certaines applications telles que celles de la protonthérapie sont uniques, mais de façon générale l'utilisation des radioéléments en médecine présente des avantages indiscutables en raison de leur **action au niveau de la molécule et de la cellule**. Il n'existe pas à l'heure actuelle d'alternatives plus performantes.

**Chaque année dans le monde, les espoirs de guérison de 30 millions de patients reposent sur l'usage des radioéléments** (principalement technétium 99m); et ce n'est qu'un début, vu les perspectives de développement que propose encore aujourd'hui la physique nucléaire.

**L'imagerie médicale**, qu'elle soit générée par l'usage de rayons X ou de radioéléments, est certainement l'un des domaines de la médecine qui a beaucoup progressé ces vingt dernières années. Ces récentes découvertes permettent non seulement un **meilleur diagnostic** mais offrent aussi indirectement de **nouveaux espoirs de traitement pour de nombreuses maladies**. L'identification précise de la lésion facilite déjà le recours à la chirurgie, seule solution thérapeutique pour certains malades. De telles techniques permettent également de mieux comprendre le fonctionnement de certains organes encore mal connus, comme celui du cerveau.

Dans le cas des applications médicales des rayonnements ionisants, il convient de rappeler que l'un des trois principes fondant la radioprotection, en l'occurrence le principe de limitation des doses, n'est pas applicable tel quel (voir p.18). En effet, contrairement aux autres types d'applications, les expositions médicales présentent un intérêt direct pour le patient qui les subit, soit à des fins diagnostiques soit à des fins thérapeutiques. C'est donc au praticien d'apprécier au cas par cas le niveau d'exposition à appliquer à son patient pour atteindre le but recherché.



## Radiodiagnostic (radiographie aux rayons X)

Le radiodiagnostic est la discipline de l'imagerie médicale qui comprend l'ensemble des **techniques d'exploration morphologique du corps humain utilisant les rayons X**. Dès décembre 1895, W. C. Röntgen, découvreur des rayons X, réalise une première radiographie de la main de sa femme. Cette technique met en œuvre la capacité des rayons X à traverser le corps humain en étant plus ou moins absorbés selon la nature des tissus traversés (les os étant plus opaques et les muscles plus transparents). Ce type de rayonnement permet donc d'effectuer des radiographies afin, par exemple, de déceler une fracture ou des tissus endommagés par une maladie (radiographies pulmonaires, par exemple).

La **radiologie "conventionnelle"** couvre la grande majorité des examens radiologiques réalisés. Il s'agit principalement des examens osseux, du thorax et de l'abdomen.

Le **scanner** CT (Computerized Tomography), ou tomographe par ordinateur, permet, à l'aide d'un faisceau de rayons X étroitement collimaté, émis par un tube radiogène tournant autour du patient et associé à un système informatique d'acquisition d'images, la reconstitution en trois dimensions des organes avec une qualité d'image souvent supérieure à celle de la radiologie conventionnelle, donnant une vision plus contrastée de la structure des organes. Le scanner étudie le cerveau, la cage thoracique, l'abdomen ou encore les os; le scanner permet la détection d'anomalies qui ne sont pas visibles sur des radiographies standards, ou à l'échographie.

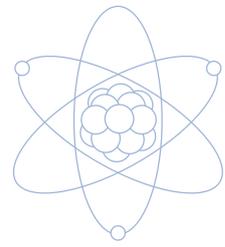
Outre la radiologie conventionnelle et le scanner, des **techniques plus spécialisées**, permettant d'élargir le champ des investigations, sont mises en

œuvre. Citons parmi elles la **coronarographie** (artères coronaires du cœur) ou la **mammographie**. A noter également que les équipements de **radiodiagnostic dentaire** occupent une place prépondérante dans le parc des installations radiologiques; parmi différentes possibilités techniques, citons la radiographie panoramique dentaire qui donne sur une même image l'intégralité des deux maxillaires par rotation autour de la tête du patient durant une dizaine de secondes.

Les images radiographiques représentent surtout la structure macroscopique des différents organes. Pour dégager cette structure, il faut que la différence de densité des tissus soit suffisante (par exemple entre les os et les tissus mous). A défaut, l'on injecte un "produit de contraste" (par exemple une solution iodée pour une coronarographie) afin d'obtenir une meilleure image.

Coupe transversale à travers les globes oculaires.





## Autres techniques n'utilisant pas des rayonnements ionisants

### Résonance magnétique

Le scanner, qui à son début a révolutionné le monde de la radiologie, notamment dans le domaine des explorations neurologiques, est aujourd'hui concurrencée par l'imagerie par résonance magnétique, pour certaines investigations.

Dans l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM), le patient est placé dans un **champ magnétique intense**. L'organisme contient de grandes quantités de noyaux d'hydrogène, par exemple dans les molécules d'eau. Quand ces molécules se trouvent dans un champ magnétique et sont excitées par des impulsions radio bien choisies, à des fréquences spécifiques, les **noyaux d'hydrogène** "répondent" en émettant des **ondes radio** de fréquence similaire. Ce signal permet de générer des images. Cette exploration morphologique exploite les propriétés magnétiques des noyaux des atomes des différentes structures de notre organisme.

L'avantage sur le scanner est l'absence d'irradiation; l'inconvénient est la durée de l'examen (parfois entre 20 et 30 minutes), bien plus longue qu'un scanner. L'IRM s'est imposée comme la méthode de choix pour visualiser les tissus mous avec une haute résolution spatiale. Elle est particulièrement efficace dans les structures cérébro-spinales. L'IRM sert aussi à étudier certaines fonctions du cerveau, en mesurant les changements locaux dans la circulation sanguine. La technique est coûteuse mais relativement sûre.

### Échographie (ultrasons)

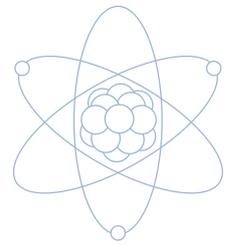
Dans l'imagerie par ultrasons, l'on se sert d'une source externe d'**ondes ultrasonores pulsées**. Le moment et la direction de l'impulsion sont tous deux connus. Les interfaces entre les différents tissus réfléchissent partiellement les ondes. Les images sont reconstruites en mesurant le temps qui s'écoule entre le départ et le retour de l'onde. L'échographie sert surtout à la visualisation des tissus mous et au suivi prénatal. Rapide, inoffensif et économique, le procédé est largement répandu dans le monde.

Image du cerveau par résonance magnétique.



Échographie d'un fœtus dans le ventre de sa mère.





### MÉDECINE NUCLÉAIRE : DIAGNOSTIC

Les utilisations diagnostiques de la médecine nucléaire se décomposent en techniques **in vivo, fondées sur l'administration à un patient de radioéléments**, et en applications **in vitro, basées sur l'examen en laboratoire d'un échantillon prélevé sur le patient** (sang, urine, biopsie, etc.). L'application in vivo la plus courante est l'imagerie nucléaire. Le dosage radio-immunologique (comme le dosage hormonal du sang) est le plus répandu dans le domaine du diagnostic in vitro.

La **médecine nucléaire** permet de réaliser de l'imagerie fonctionnelle. Elle est donc **complémentaire de l'imagerie purement morphologique** obtenue par les autres techniques d'imagerie : radiologie conventionnelle, scanner, échographie ou imagerie par résonance magnétique.

L'exemple historique qui illustre le mieux la technique est l'utilisation de l'iode radioactif pour étudier et visualiser le fonctionnement de la thyroïde, ou pour traiter les affections thyroïdiennes. Cette glande possède une affinité naturelle pour l'iode, dont elle se sert pour sécréter les hormones thyroïdiennes. En Belgique, dans le cas d'un régime alimentaire normal, la thyroïde contient 8 à 10 mg d'iode 127, stable. Mais lorsque l'on enrichit le régime en iode, par exemple par la consommation de fruits de mer, la thyroïde absorbe le supplément d'iode comme une éponge, jusqu'à saturation. La thyroïde ne fait pas de distinction entre les différents isotopes de l'iode, qu'ils soient radioactifs ou non. En conséquence, lorsque l'on administre une dose très faible mais connue d'iode radioactif (de l'iode 131 par exemple), la mesure de la quantité d'iode radioactif présente dans la thyroïde reflète l'affinité de l'organe pour l'iode, donc le fonctionnement thyroïdien (diagnostic). Comme dans toutes les mesures physiques, la technique de mesure ne doit

### In vivo

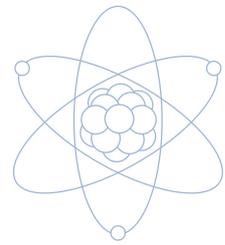
Cette technique consiste à étudier le métabolisme d'un organe grâce à une substance radioactive spécifique - appelée radiopharmaceutique - administrée à un patient. La nature du radiopharmaceutique dépend de l'organe étudié. Le **radioélément peut être utilisé soit directement, soit fixé sur un vecteur** (molécule, hormone, anticorps, etc.), qui présentent une grande affinité ou analogie avec l'organe à étudier).

La localisation dans l'organisme de la substance radioactive administrée se fait par un détecteur spécifique - appelé caméra à scintillation ou gamma-caméra - qui est constitué d'un cristal d'iodure de sodium couplé à un système d'acquisition et d'analyse par ordinateur. Cet équipement permet d'obtenir des images du **fonctionnement d'organes (scintigraphie)**; elle est utilisée par exemple dans l'exploration de la **thyroïde**, du **squelette** (scintigraphie osseuse) ou en **cardiologie** pour évaluer le fonctionnement du cœur (tomoscintigraphie myocardique).

pas perturber le fonctionnement de l'organe analysé. En effet, si la quantité d'iode administrée au patient est trop forte, la fonction thyroïdienne elle-même en sera influencée; c'est pourquoi la mesure de la fonction thyroïdienne fait appel à la plus petite quantité possible d'iode radioactif: des traces (d'où la terminologie de "traceurs"). Une radioactivité suffisante est toutefois nécessaire pour permettre une mesure de qualité suffisante (fiabilité).

L'exemple qui précède met en lumière les défis de l'imagerie nucléaire:

- choisir ou développer une molécule capable de transporter le radioélément adéquat jusqu'à l'organe examiné afin d'en étudier la diffusion temporelle et/ou spatiale
- optimiser la dose administrée pour obtenir le meilleur diagnostic, tout en minimisant l'irradiation
- éviter tout effet pharmaceutique de la molécule en administrant seulement des traces.



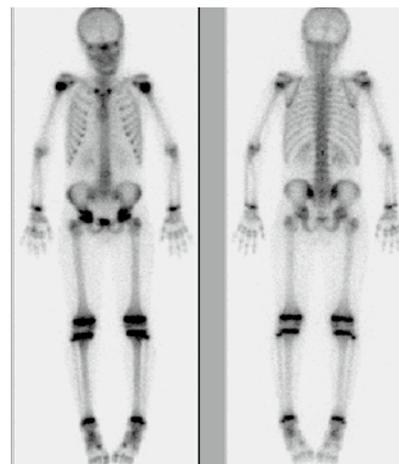
Les radioéléments, ou traceurs, sont choisis de telle façon que leur émission  $\gamma$  autorise leur détection externe. Ces radioéléments, émetteurs dits " $\gamma$  purs" (c'est-à-dire qu'ils n'émettent que des photons  $\gamma$ ) sont variés: technétium 99m, iode 123, thallium 201, indium 111, etc. Le technétium 99m est de loin (plus de 90 % des cas) le radioélément le plus employé; il a en effet des caractéristiques physiques excellentes, est peu coûteux, facilement disponible et l'énergie de son rayonnement est très indiquée pour le patient d'un point de vue dosimétrique. Il n'existe pas de technétium stable dans la nature: tous ses isotopes sont radioactifs. Le technétium 99m est le nucléide fille du molybdène 99, lui-même produit de la fission de l'uranium 235; sa demi-vie est de 6h, une durée idéale d'acquisition des images par les  $\gamma$ -caméras pour la majorité des examens, mais trop courte pour permettre sa conservation plus d'une journée. Le molybdène 99 possède une demi-vie de 66h. Cela permet de stocker un générateur de molybdène 99 (la "vache") et de "traire" son produit de décroissance, le technétium 99m, suivant les besoins. En Belgique, le molybdène 99 est produit par irradiation de cibles d'uranium hautement enrichi dans un réacteur (notamment BR2 du SCK.CEN), avant extraction et purification à l'Institut des Radioéléments, à Fleurus.

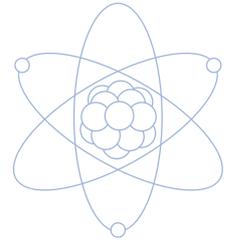
En 1935, le prix Nobel G. de Hevesy injectait à des rats une petite quantité de phosphore 32. Après avoir mesuré la radioactivité des os, il rédigeait une thèse très controversée à l'époque: "Ce résultat corrobore fortement le caractère dynamique du processus de formation des os. L'os absorbe continuellement des atomes de phosphore; ceux-ci sont ensuite perdus en tout ou en partie, puis remplacés par d'autres atomes de phosphore.". Cette conception dynamique contredisait toutes les théories statiques du moment, mais G. de Hevesy avait raison, et de nos jours, la **scintigraphie osseuse** est l'examen le plus souvent réalisé en médecine nucléaire.

Avant l'examen, l'on injecte du phosphonate, marqué de technétium 99m. Ce traceur cible activement les zones de croissance osseuse. L'image de la radioactivité reflète la croissance osseuse et le métabolisme des os.

La figure ci-dessous illustre une scintigraphie osseuse normale, réalisée à l'aide d'une  $\gamma$ -caméra, aussi appelée caméra d'Anger, du nom de son inventeur H. Anger, en 1956. Elle représente le métabolisme des os d'un jeune patient (de face et de dos).

S'agissant d'images numérisées, une **reconstitution tridimensionnelle** (la caméra tourne autour du patient) des organes, selon le même principe que pour le scanner à rayons X, peut être réalisée. On parle alors de **tomographie** à travers le corps; D. Kuhl a développé la tomographie par émissions dès 1964. En imagerie tomographique, la résolution spatiale est comparable à celle de l'imagerie conventionnelle, mais le contraste des lésions, très amélioré, facilite grandement leur analyse.





### Tomographie par émission de positrons (PET - Positron Emission Tomography)

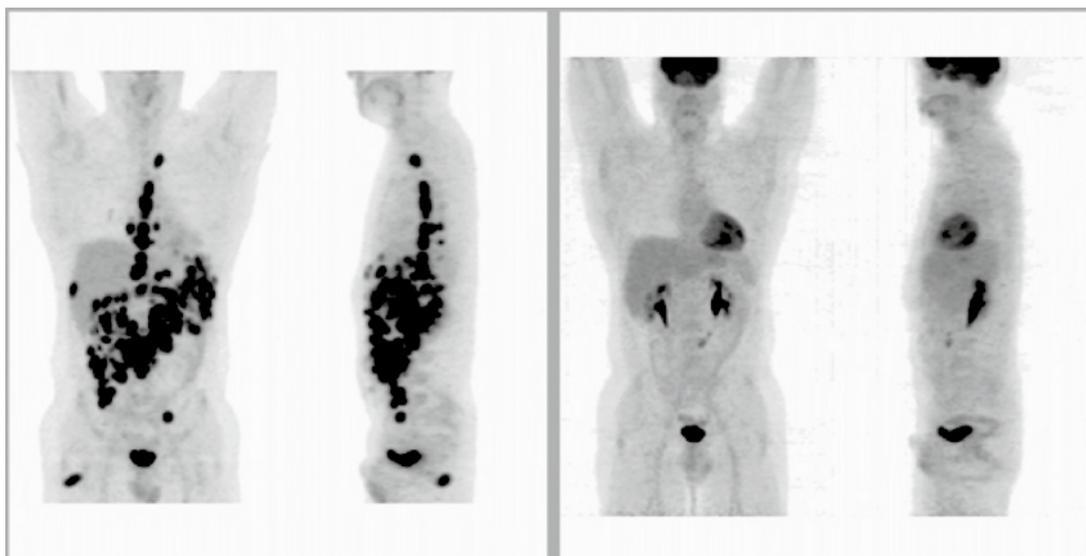
Cette technique permet d'obtenir des images en coupes représentant la distribution temporelle, régionale et quantitative d'un traceur radioactif, émetteur de positrons (électrons positifs, antimatière des électrons négatifs).

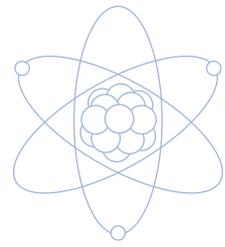
Les traceurs sont marqués par des radioéléments, émetteurs de positrons (voir aussi p.11), et deviennent donc des radiotraceurs. La production des radioéléments nécessitant un cyclotron et la période d'émission étant courte, les radiotra-

ceurs ne peuvent être utilisés que sur le lieu même ou à proximité du lieu de leur production. L'avantage d'un tel marquage, avec une radioactivité spécifique très élevée, permet l'**injection de très faibles quantités de traceur**. Le 18-FDG (désoxyglucose marqué au fluor 18) convient bien. Il possède une demi-vie de 110 minutes et se désintègre en oxygène 18 stable, en émettant un positron.

Le positron, une fois émis, va "voyager" jusqu'à rencontrer un électron libre. Le choc va les annihiler tous les 2 et générer l'émission simultanée de 2 photons  $\gamma$  partant à  $180^\circ$  l'un de l'autre. Ces photons seront détectés par des caméras dites à positrons, reliées au ordinateur.

Une série d'images par caméra à positrons d'un patient qui souffre de lymphome (tumeur dans glandes lymphatiques), avant et après chimiothérapie.





### In vitro

Il s'agit d'une technique d'analyse de biologie médicale, **sans administration de radioéléments aux patients, permettant de doser certains composés contenus dans les fluides biologiques** et notamment le sang: hormones, médicaments, marqueurs tumoraux, etc. Cette technique met en œuvre des méthodes de dosage fondées sur les réactions immunologiques (réactions anticorps-antigènes marqués à l'iode 125), d'où le nom de radio-immunologie ou RIA (Radiolmmunology Assay).

En 1977, Rosalyn Yallow et Solomon Berson ont reçu le prix Nobel pour leurs travaux sur cette méthode de dosage in vitro, faisant tout à la fois appel à l'immunologie, à la recherche sur les isotopes, aux mathématiques et à la physique. Au départ, les auteurs cherchaient à déterminer les niveaux d'insuline. La sensibilité de la technique RIA est telle qu'elle permet la détermination de teneurs en insuline ne dépassant pas 10 à 20 pg (10 pg = 1 cent-milliardième de gramme) par ml.

Supposons un échantillon dans lequel vous devez déterminer une concentration inconnue d'une hormone donnée. Préparez un échantillon de solution standard de cette hormone; ajoutez ensuite à ces échantillons une quantité connue d'hormone radio-marquée. Cela fait, additionnez les deux échantillons d'anticorps de l'hormone. Les hormones marquée et non-marquée vont se faire concurrence dans la liaison à l'anticorps. En mesurant la radioactivité de la part d'hormone liée et non liée dans la solution standard et dans la solution inconnue, vous pouvez obtenir la concentration de l'hormone dans l'échantillon inconnu.

**Le dosage radio-immunologique a engendré une révolution dans la recherche biologique et médicale.** Nous disposons aujourd'hui d'un grand nombre de

procédures de type RIA pour déterminer à peu près tout ce que nous pouvons souhaiter mesurer: peptides<sup>3</sup> et hormones, enzymes, virus, anticorps, médicaments les plus divers. Aujourd'hui, cependant, les méthodes radioactives cèdent progressivement la place aux analogues non radioactifs, surtout pour des raisons de radioprotection et de coût du traitement des déchets.

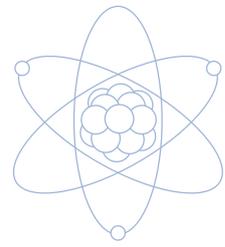
### RADIOTHÉRAPIE

Depuis les premiers traitements au radium<sup>4</sup> (fin du 19<sup>ème</sup> siècle), la radiothérapie a considérablement évolué. Avec la chirurgie et la chimiothérapie (utilisant des molécules toxiques), elle constitue l'une des **techniques majeures employées pour le traitement des tumeurs cancéreuses**. Elle met en œuvre les rayonnements ionisants, issus soit d'une source externe soit d'une source interne, pour la destruction des cellules malignes. Les doses administrées sont délivrées et calculées de manière à concentrer le rayonnement sur la tumeur, pour irradier le moins possible les cellules voisines saines.

#### La radiothérapie externe, les accélérateurs de particules

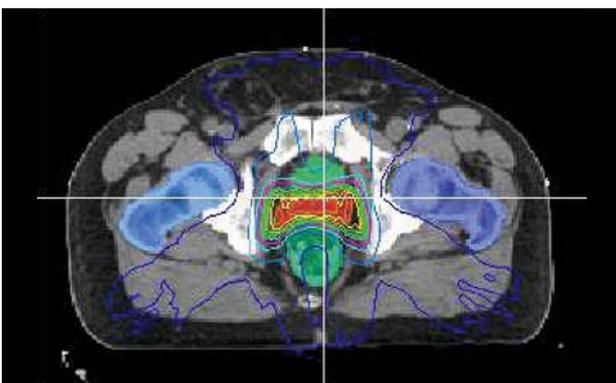
Les séances d'irradiation sont toujours précédées par l'élaboration du plan de traitement dans lequel sont définis précisément, pour chaque patient, la dose à délivrer, le volume cible à traiter, la dosimétrie, la balistique des faisceaux d'irradiation et la durée de chaque traitement. L'élaboration de ce plan, qui a pour but de fixer les conditions permettant d'atteindre une dose élevée et homogène dans un volume cible et la préservation des tissus sains, nécessite une coopération étroite entre le radiothérapeute et le radiophysicien.

3. *Un peptide est une chaîne comportant moins de 50 acides aminés reliés par des liaisons peptidiques (liaison covalente entre un atome de carbone et un atome d'azote de deux acides aminés).*  
4. *Les premières curiethérapies avec utilisation de radium ont été réalisées quelques années après la découverte de la radioactivité par Becquerel et du radium par les membres de la famille Curie. Marie Curie a créé l'institut du Radium et a personnellement calibré plus de 5 000 sources de radium.*



L'irradiation est effectuée à l'aide, soit d'**accélérateurs de particules** (linéaire ou cyclotron) soit, de moins en moins, d'appareils de téléthérapie équipés d'une source de cobalt 60 (**cobalthérapie**) ou de césium 137. L'accélérateur permet la production, soit d'**électrons** de haute énergie, soit de particules chargées comme des **protons**, soit, indirectement, de **photons** ou de **neutrons**. Les **faisceaux** de rayonnement obtenus sont **extrêmement fins**, ce qui permet de les orienter avec une grande précision. Les plus courants sont les accélérateurs d'électrons. Utilisés directement, les électrons produits traitent les premiers centimètres et s'arrêtent net en fonction de leur énergie. On peut choisir très précisément cette limite, les électrons génèrent alors des rayons X dont l'énergie est déposée plus profondément. Les photons sont également utilisés à des fins thérapeutiques. **La radiothérapie permet d'irradier des tumeurs profondes (10 à 15 cm) en épargnant les tissus superficiels.**

Simulation de zones à irradier avec les doses (radiothérapeutiques) associées.

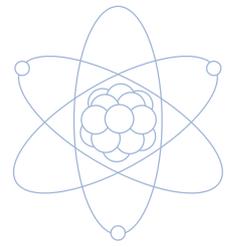


Le **cyclotron**<sup>5</sup> est surtout employé en **protonthérapie**. La protonthérapie exploite deux propriétés liées à l'interaction des faisceaux de protons avec la matière: une faible dispersion latérale, conséquence de la diffusion limitée des protons au cours de leur trajectoire et un dépôt d'énergie en forme de pic (pic de Bragg), le dépôt de dose au niveau du pic étant là très important et la profondeur d'apparition du pic étant parfaitement contrôlable. Cette précision balistique permet d'adapter chaque faisceau de protons pour conformer en 3 dimensions la distribution de dose à la forme du volume-cible (la tumeur) à irradier. Grâce à cela, **il est possible d'augmenter les doses dans les volumes traités tout en minimisant la dose globale et donc les complications dans les tissus sains avoisinants**. La protonthérapie promet d'être une technique de choix dans la radiothérapie dans les cas où la tumeur traitée est située au voisinage immédiat de structures critiques radiosensibles (voies optiques, moelle épinière,...).

### La radiothérapie par sources scellées implantées in-vivo dans le patient (curiethérapie)

La curiethérapie, appelée également brachythérapie, permet de traiter, de façon spécifique ou en complément d'une autre technique de traitement, des **tumeurs cancéreuses**, notamment de la sphère ORL, de la peau, du sein ou des organes génitaux. Les principaux radionucléides employés en curiethérapie, sous forme de sources scellées, sont le césium 137 et l'iridium 192 qui ont définitivement remplacé le radium 226 utilisé dans la première moitié du XXème siècle sous forme d'aiguilles ou de tubes.

5. Le cyclotron est un accélérateur électromagnétique de haute fréquence. Dans son principe, le cyclotron utilise l'action combinée d'un champ magnétique et d'un champ électrique pour délivrer un faisceau de particules accélérées. Ces particules, électriquement chargées (protons, deutons), sont introduites au centre d'une enceinte où règne un vide très poussé. Elles décrivent une trajectoire en spirale depuis le centre du cyclotron jusqu'aux bords tandis que leur vitesse s'accroît. Elles parcourent ainsi plusieurs tours avant d'être extraites de l'accélérateur puis éventuellement projetées à très grande vitesse sur une cible située à quelques mètres. Il se produit alors des transmutations avec production d'isotopes radioactifs et des désintégrations d'atomes, lesquels retrouvent un état stable en émettant un rayonnement. Les cyclotrons permettent d'atteindre des énergies élevées jusqu'à environ 1 GeV. Les synchrotrons sont des modèles géants modernes des cyclotrons qui ont plusieurs centaines de mètres de rayon et qui permettent d'obtenir des particules d'énergie de plusieurs centaines de GeV.



### Les techniques de curiethérapie mettent en œuvre 3 types d'applications :

- la curiethérapie à bas débit (0,4 à 2 Gy/h), qui nécessite l'hospitalisation du patient durant plusieurs jours et qui se présente le plus souvent sous forme de fils ayant une longueur de quelques centimètres; depuis quelques années, l'utilisation de sources scellées d'iode 125 pour le traitement des cancers de la prostate vient compléter cette application
- la curiethérapie pulsée à moyen débit (2 à 12 Gy/h), qui utilise un projecteur de source spécifique (iridium 192 de petite dimension); compte tenu des débits de dose plus importants, les irradiations peuvent ainsi être fractionnées en plusieurs séquences (pulses), offrant plus de confort au patient, qui ne doit pas porter la source en permanence
- la curiethérapie à haut débit (supérieur à 12 Gy/h), qui utilise également un projecteur de source et qui se caractérise par des temps de traitement très courts (quelques minutes maximum).

### La radiothérapie par sources non-scélées administrées in-vivo (radiothérapie métabolique)

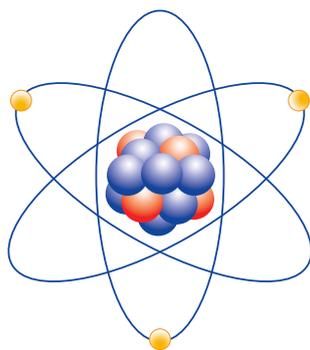
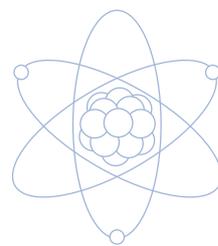
Pour pouvoir administrer de fortes doses de rayonnement à une tumeur sans irradier les tissus sains (non ciblés), la source de rayons doit se trouver le plus près possible de la cible. A cet effet, l'on utilise une molécule porteuse, qui présente une grande affinité pour l'organe et/ou la tumeur. La molécule porteuse est le "missile" qui transporte le radioélément, "l'ogive" émettant les particules alpha ou  $\beta$  vers les cellules visées. C'est pourquoi dans certaines thérapies, l'on injecte directement un radiopharmaceutique (un radioélément lié à une molécule ayant une affinité

élevée pour le tissu à détruire). C'est le cas de l'iode 131, qui donne de bons résultats dans le traitement de tumeurs de la glande thyroïde, le traitement exploitant l'avidité du tissu thyroïdien pour l'iode (voir aussi encart p.23). Un isotope très prometteur pour d'autres indications est le rhénium 188 (émetteur  $\beta$  et  $\gamma$ ), en raison de ses propriétés physiques et chimiques. L'yttrium 90 (émetteur  $\beta$  pur) est également utilisé à cette fin. Citons encore le strontium 89 ou le samarium 153, utilisé pour soulager la douleur due aux métastases osseuses. Le strontium suit la même voie métabolique que le calcium, s'accumulant dans les tissus osseux fraîchement créés, ils irradient les terminaisons nerveuses et soulagent la douleur.

Plus récemment, la radioimmunothérapie a été développée. En effet, dans la majorité des ions et molécules simples, l'affinité pour la cible est trop faible pour servir à des fins thérapeutiques. Le recours à de grandes molécules, qui se lient aux antigènes associés aux cellules cancéreuses, et non aux tissus sains, peut contribuer à améliorer la sélectivité du traitement.

La stratégie est la suivante :

- un anticorps monoclonal adéquat est injecté; un petit pourcentage de l'anticorps injecté est marqué d'un émetteur  $\gamma$  pour les besoins de l'imagerie
- des images sont générées pour vérifier l'absorption par la tumeur
- lorsque l'absorption sélective est suffisante, on injecte une molécule (appelée également ligand) marquée, dotée d'une très forte affinité pour l'anticorps. Le ligand, marqué à l'isotope émetteur de  $\beta$  ou  $\alpha$ , se lie à l'anticorps monoclonal. L'isotope (par exemple le rhénium 188) est choisi pour délivrer une dose mortelle aux cellules cancéreuses entourant l'anticorps monoclonal.



# 4

## Applications

Depuis la découverte de la radioactivité il y a une centaine d'années environ, les applications des réactions nucléaires, des rayonnements ionisants et des substances radioactives se sont développés. La radioactivité est actuellement utilisée dans une multitude de domaines dont la production d'électricité et la médecine ne représentent que la partie la plus connue. Mais les isotopes radioactifs ont eux aussi rapidement été utilisés dans les domaines scientifique, alimentaire, domestique, spatial ainsi qu'agricole, industriel ou archéologique, pour n'en citer que quelques-uns. Voici quelques précisions à leur sujet.

### RADIOSTÉRILISATION DANS DIVERS SECTEURS

Destruction de germes pathogènes et prolongation de la durée de vie d'aliments.



L'**ionisation des denrées alimentaires** consiste à exposer les produits aux rayonnements X ou gamma afin d'y détruire les micro-organismes. Naturellement, les aliments ne deviennent pas radioactifs! Ils ne sont ni contaminés ni activés par l'irradiation qu'ils subissent (l'énergie des rayonnements X ou gamma utilisés ne sont pas suffisants pour les rendre eux-mêmes radioactifs). Les

**crevettes roses et grises**, les cuisses de grenouilles, les **épices**, certains produits **surgelés**, les bouchons de bière de luxe sont stérilisés de cette façon. Cette technique permet également de retarder la germination d'une série de végétaux comme la pomme de terre, l'oignon ou l'ail.

Elle est enfin utilisée aux Etat-Unis pour assurer la sécurité alimentaire des hamburgers. L'irradiation est également largement utilisée pour stériliser le **matériel chirurgical**, les **prothèses** et autres **produits pharmaceutiques** ou **cosmétiques**.

La **radiostérilisation d'insectes parasites** a permis l'éradication du «screw-worm», parasite du bétail en Floride et au Texas dans les années 70 et, récemment, de la lucilie bouchère en Egypte et en Libye. Cette méthode de lutte

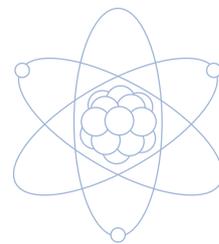
consiste à lâcher dans la population naturelle d'insectes une forte proportion de mâles rendus stériles par irradiation, ce qui diminue fortement, jusqu'à quasi-disparition, la descendance des femelles. Cela permet de lutter à grande échelle contre le développement d'un insecte nuisible sans utiliser de produits toxiques.

### USAGES DOMESTIQUES

#### Des détecteurs incendie aux peintures

Dans la mesure du possible, on essaie de restreindre les sources radioactives « domestiques ». Non pas que ces sources soient dangereuses à l'usage puisqu'elles sont scellées. Par contre, une fois dans la chaîne des déchets, il faut éviter toute diffusion de particules radioactives dans l'environnement.

La commercialisation des paratonnerres en comportant est aujourd'hui interdite en Belgique. Des mesures ont été prises pour la récupération des détecteurs de fumée (incendie). Tout laisse penser qu'à terme, les détecteurs optiques, dont les performances s'améliorent, remplaceront les détecteurs ioniques qui ne seront plus utilisés que dans des usages très pointus. De la même manière, ont été abandonnées les peintures contenant des produits radioactifs (radium et tritium), qui rendaient des objets luminescents (aiguilles et chiffres de montres et cadrans de contrôle, par exemple).



### SCIENCES DE LA TERRE

En **agronomie**, les techniques nucléaires ont fourni des outils importants pour l'exploitation rationnelle des ressources en eau du sol: basé sur le ralentissement préférentiel des neutrons rapides par les atomes d'hydrogène de l'eau, l'**humidimètre**, ou sonde à neutrons, mesure avec précision l'humidité d'un sol.

La radioactivité est présente également dans les **sciences de la terre**. C'est ainsi que l'uranium, le potassium, le rubidium ont permis de préciser l'**âge de la terre**. Des climatologues mesurent la quantité de béryllium 10 produit par les rayons cosmiques dans l'atmosphère et stocké dans les glaces des pôles: leur abondance dépend de l'activité solaire. Le béryllium 10 a une demi-vie de 1,6 millions d'années, il est un des produits de la cassure (spallation) des noyaux d'oxygène ou de carbone par le rayonnement cosmique. Il fournit des informations précieuses sur l'évolution de l'atmosphère depuis longtemps.

Des océanographes peuvent à partir du dosage du **carbone 14** dans les océans, retracer les chemins des courants océaniques. Grâce au carbone 14, on peut également remonter jusqu'à des dizaines de milliers d'années dans le passé. Le carbone, entrant dans la composition de la molécule constitutive du gaz carbonique, présent dans l'atmosphère, est très répandu dans notre environnement. Ce carbone est constitué principalement de carbone-12, qui est stable, et d'une très faible proportion de carbone 14 qui est radioactif avec une période de 5730 ans (le carbone 14 est produit en permanence dans l'azote de l'air par le rayonnement cosmique). Les divers échanges (respiration, photosynthèse, alimentation) qui se produisent entre l'atmosphère et le monde "vivant" ont pour effet d'équilibrer le rapport entre la quantité de carbone 12 et celle de carbone 14. Mais, dès qu'un organisme meurt, le carbone 14 qu'il contient n'est plus renouvelé puisque les échanges avec le monde extérieur cessent. Sa proportion se met alors peu à peu à diminuer par décroissance, et le rapport entre les deux isotopes du carbone permet en-

suite de connaître la date de la mort d'un organisme bien après que celle-ci ait eu lieu. Moins il reste de carbone 14 dans un échantillon à dater, et plus sa mort est ancienne. Le carbone 14 a révolutionné la recherche en archéologie, car on peut, grâce à lui, **dater des objets ou des lieux**, jusqu'à environ 40 000 ans. D'autres méthodes radioactives (analyse du rapport potassium/argon par exemple) sont utilisées pour des périodes plus lointaines.

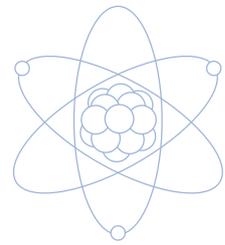
**Squelette pétrifié d'un cheval trouvé à proximité d'Oudenburg, non loin d'Ostende.**



Les **vestiges du passé** peuvent également être identifiés, analysés, étudiés, afin de pouvoir en garantir l'authenticité, d'en tirer le maximum d'informations de nature archéologique ou historique et ainsi de fournir des infos sur la manière dont nos ancêtres ont vécu. D'autre part, leur grand âge a rendu ces objets fragiles, l'utilisation de la radioactivité permet de les traiter et les protéger pour que de nombreuses générations puissent encore les admirer.

### INDUSTRIE

Des **traceurs radioactifs** peuvent être utilisés pour suivre la circulation de produits au sein d'une usine chimique ou pour détecter des fuites dans les conduites souterraines. Les traceurs radioactifs interviennent dans le contrôle de nombreux procédés de fabrication industriels. Il s'agit de contrôles non destructifs qui ne perturbent pas les cycles de fabrication. Par exemple, dans une raffinerie, une pincée d'atomes d'argon 41 injectés accompagne la phase légère dans une tour de craquage catalytique



de fuel lourd. Les ingénieurs suivent ainsi et améliorent la production de l'essence destinée aux réservoirs des automobilistes. Dans une grande cimenterie, les trémies amenant les matières premières passent devant une source de neutrons. Les rayons gamma de désexcitation des noyaux activés renseignent sur la composition exacte des éléments du mélange, permettant d'ajuster en continu les proportions et d'assurer une qualité constante du ciment.

La radioactivité est également utilisée pour **modifier**, avec des doses d'irradiation beaucoup plus intenses, **des propriétés mécaniques et chimiques**. Un procédé industriel, similaire à celui employé pour la restauration de meubles anciens, transforme ainsi du bois tendre en un parquet dur comme du marbre. Ces parquets résistants trouvent leur emploi dans des lieux de grand passage, comme les aéroports, des lieux publics, des grands magasins ou des musées, comme à Paris avec la grande galerie de l'évolution au muséum d'histoire naturelle.

Il existe de nombreuses autres applications industrielles faisant appel à des radioéléments conditionnés en **sources scellées** afin que seul le rayonnement puisse s'en échapper et être utilisé sans que la matière de la source elle-même se disperse dans l'environnement (ces sources sont dites irradiantes et non contaminantes). Avant 1940, les seules sources scellées radioactives étaient les sources de radium utilisées en médecine. Après la seconde guerre mondiale, avec l'apparition des réacteurs nucléaires et des premiers cyclotrons, il devient possible de créer de nouveaux types de sources et de nombreuses nouvelles applications ont vu le jour sous forme d'applications industrielles. Ces applications se sont développées dans les domaines où il n'existait pas de méthodes équivalentes sans l'utilisation de la radioactivité.

La **radiographie industrielle** est une forme d'analyse non destructive. Elle permet, grâce aux rayonnements X ou  $\gamma$ , de vérifier la qualité de pièces métalliques, soudures, moulages, etc. Souvent, il n'est pas possible d'utiliser les

rayons X sur certains chantiers, l'on utilise des sources scellées pour ces applications. Les isotopes les plus utilisés sont le cobalt 60, l'irridium 192, le sélénium 75, le thulium 170, l'ytterbium 169 ou le césium 137. Les neutrons sont également utilisés pour la neutrographie industrielle (par exemple pour déceler d'éventuelles traces de corrosion dans les ailes d'avion).

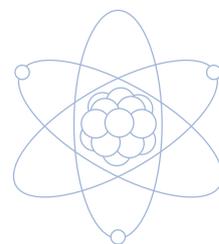
Les jauges industrielles sont très diverses, elles utilisent généralement les isotopes suivants : césium 137, cobalt 60, américium 241, krypton 85, strontium 90, prométhium 147, radium 226 et associé ou non au béryllium.

Les différentes familles de jauges sont :

- les jauges de transmission, qui mesurent des densités ou des flux de fluides (brasserie par exemple)
- les jauges de rétrodiffusion, qui mesurent l'humidité ou la corrosion
- les jauges réactives, qui utilisent des phénomènes comme la fluorescence X et analysent les constituants de certains matériaux (comme la peinture) ou minerais ou l'épaisseur de certains enduits.

[Radiographie d'un joint de pipe-line, afin de contrôler l'éventuelle présence de fissures.](#)





L'exploitation des puits de forage utilise de nombreuses sources destinées à mesurer la densité, la porosité, l'humidité, le contenu en hydrocarbure de certaines structures géologiques ou de certains matériaux. Le césium 137 est l'isotope le plus utilisé à cette fin, avec les sources de neutrons telles que l'américium/béryllium, le plutonium/béryllium ou le radium/béryllium. Il y a quatre types de techniques utilisées :

- les mesures gamma, permettant d'identifier les roches par leur rayonnement naturel (uranium, thorium, potassium)
- les mesures neutrons, permettant d'évaluer la porosité des roches
- les mesures gamma/gamma, utilisées pour détecter les gaz
- les mesures neutrons/gamma, qui quantifient le chlore et le sel contenus dans les roches.

Les **appareils antistatiques** sont utilisés pour combattre les problèmes électrostatiques dans les industries où les étincelles et les poussières peuvent être problématiques, comme dans les industries électroniques. Ces dispositifs utilisent des sources (rayonnements alpha) de grandes dimensions, principalement l'américium 241, le radium 226 et le polonium 210.

Citons, pour terminer ce tour d'horizon, loin d'être exhaustif, les **applications spatiales**. Dès les années 60, on a utilisé des sources radioactives pour produire de l'électricité à bord des engins spatiaux. Des générateurs thermoélectriques ont été développés afin de convertir l'énergie générée par la décroissance radioactive en électricité. Le plutonium 238 permet une utilisation durant cinq ans sans inconvénient majeur.

Application	Radioélément	Activité de la source
Radiographie industrielle	$^{192}\text{Ir}$ $^{60}\text{Co}$ ( $^{137}\text{Cs}$ , $^{170}\text{Tm}$ , $^{169}\text{Yb}$ )	0.1-5 TBq 0.1-5 TBq
Puits de forage	$^{241}\text{Am/Be}$ $^{137}\text{Cs}$ ( $^{252}\text{Cf}$ )	1-800 GBq 1-100 GBq
Détecteur d'humidité	$^{241}\text{Am/Be}$ $^{137}\text{Cs}$ ( $^{252}\text{Cf}$ , $^{226}\text{Ra/Be}$ )	0.1-2 GBq 400 MBq
Jauge de transmission	$^{137}\text{Cs}$	0.1-40 GBq
Jauge de densité	$^{137}\text{Cs}$ $^{241}\text{Am}$	1-20 GBq 1-10 GBq
Jauge de niveau	$^{137}\text{Cs}$ $^{60}\text{Co}$ ( $^{241}\text{Am}$ )	0.1-20 GBq 0.1-10 GBq
Jauge d'épaisseur	$^{85}\text{Kr}$ $^{90}\text{Sr}$ ( $^{14}\text{C}$ , $^{147}\text{Pm}$ , $^{241}\text{Am}$ )	0.1-50 GBq 0.1-4 GBq
Appareils antistatiques	$^{241}\text{Am}$ $^{210}\text{Po}$ ( $^{216}\text{Ra}$ )	1-4 GBq 1-4 GBq
Jauge réactive	$^{55}\text{Fe}$ $^{109}\text{Cd}$ ( $^{238}\text{Pu}$ , $^{241}\text{Am}$ , $^{57}\text{Co}$ )	0.1-5 GBq 1-8 GBq



Fondamentalement, le principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire ne diffère pas de celui d'une centrale à combustible fossile. Seule la manière de produire la chaleur change. Les centrales nucléaires utilisent, dans un réacteur, la fission d'atomes d'uranium comme source de chaleur, tandis que les centrales dites "classiques" produisent de la chaleur par la combustion de gaz naturel, de charbon ou de pétrole. Dans les deux cas, la production de chaleur permet de transformer de l'eau en vapeur.

## DE L'ÉNERGIE DE FISSION ET DES RÉACTIONS EN CHAÎNE...

Dans un réacteur à fission nucléaire, l'énergie est obtenue lorsqu'un noyau atomique lourd (comme l'uranium<sup>6</sup> 235) frappé par un neutron se brise en deux noyaux plus légers. Outre ces deux produits de fission, la fission libère quelques neutrons, des particules alpha, bêta et des rayonnements gamma. On compte environ 200<sup>7</sup> produits de fission qui constituent les isotopes d'une trentaine d'éléments chimiques. La plupart de ces produits sont radioactifs et ils évoluent par désintégrations successives vers un état stable (voir chapitre 2). La masse des particules obtenues et des produits de fission est légèrement inférieure à la masse initiale constituée du noyau atomique lourd et du

neutron qui l'a brisé. La masse manquante à l'arrivée n'a pas disparu, elle s'est transformée en énergie, d'après la loi d'Einstein<sup>8</sup>  $E = mc^2$ , sous forme de chaleur. L'énergie thermique libérée résulte principalement de l'énergie cinétique des morceaux du noyau de l'atome originel d'uranium. Par atome d'uranium 235 fissionné, la libération d'énergie est égale à 200 millions d'électronvolts<sup>9</sup> (MeV). La fission d'une dizaine d'atomes d'uranium 235 libère en moyenne 23 neutrons. Ces neutrons ont tendance à être capturés par des matériaux absorbants (bore, cadmium, gadolinium) ou à s'échapper du milieu où se produit la fission. Afin d'obtenir une réaction en chaîne à l'équilibre, il est nécessaire de récupérer un neutron par atome d'uranium fissionné pour produire une nouvelle fission. Dans le cas des réacteurs Pressurised

Transformation  $U^{238}$  en  $Pu^{239}$

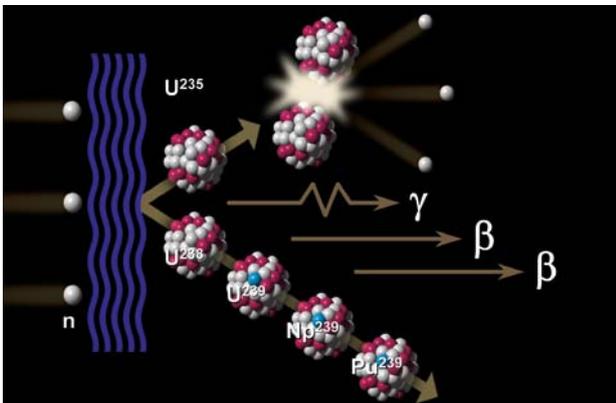
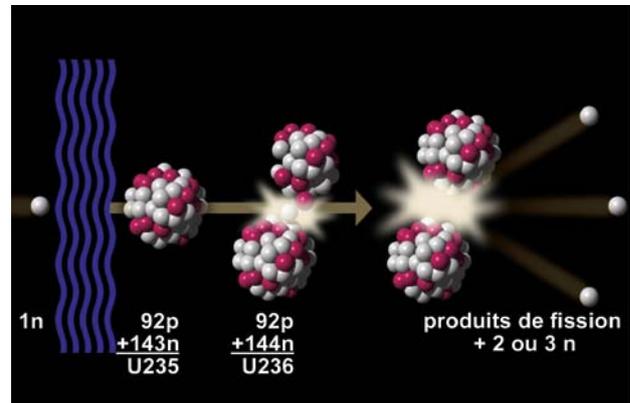
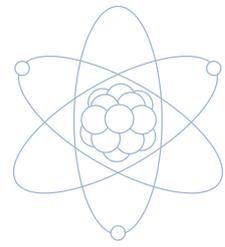


Schéma de la réaction de fission



6. L'élément le plus lourd existant en abondance à l'état naturel, l'uranium offre le profil idéal pour l'accomplissement d'une réaction de fission et présente donc des caractéristiques physiques qui permettent de l'utiliser en tant que combustible dans des centrales nucléaires. C'est plus précisément un de ses isotopes, l'uranium 235, qui est fissile. Mais si l'uranium est relativement abondant sur terre, la proportion de l'isotope fissile 235 est minime (0,7%) par rapport à l'isotope 238 (99,3%) non fissile.
7. 24 heures après l'arrêt des fissions, il n'en reste que environ 200 qui sont encore radioactifs.
8.  $m$  : masse;  $c$  : vitesse de la lumière (dans le vide).
9. L'électronvolt (eV) correspond à l'énergie acquise par un électron accéléré à travers une différence de potentiel d'un volt. Un électronvolt est égal à  $1,6 \cdot 10^{-19}$  joule ou  $4,44 \cdot 10^{-23}$  wattheure.



Water Reactor (comme les réacteurs belges, voir p. 38), il est nécessaire de "ralentir" les neutrons libérés afin qu'ils soient absorbés par l'uranium 235 (et les fissionnent) plutôt que par l'uranium 238, ce rôle est joué par le modérateur. Les neutrons issus des noyaux lors de la fission et ainsi ralentis par le modérateur vont frapper d'autres noyaux atomiques qui à leur tour vont subir une fission, donc produire de la chaleur ainsi que des rayonnements et libérer d'autres neutrons.

**Lorsque chaque fission est suivie d'une nouvelle fission, la réaction en chaîne est auto-entretenu** et elle fournit une quantité de chaleur considérable et constante, on dit que le réacteur est "critique".

### ... À LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Les produits de fission, contenus dans des crayons de combustible, transforment donc leur énergie cinétique en chaleur et réchauffent l'eau du circuit primaire, qui atteint une température moyenne de 300 °C; grâce au pressuriseur, l'eau est maintenue sous pression (155 bars) et donc, ne bout pas. Au-delà de jouer un rôle de modérateur, cette eau sert également de caloporteur (transporteur de chaleur): en contact avec le coeur du réacteur, elle transmet sa chaleur à l'eau du circuit secondaire dans le générateur de vapeur (grands échangeurs de chaleur

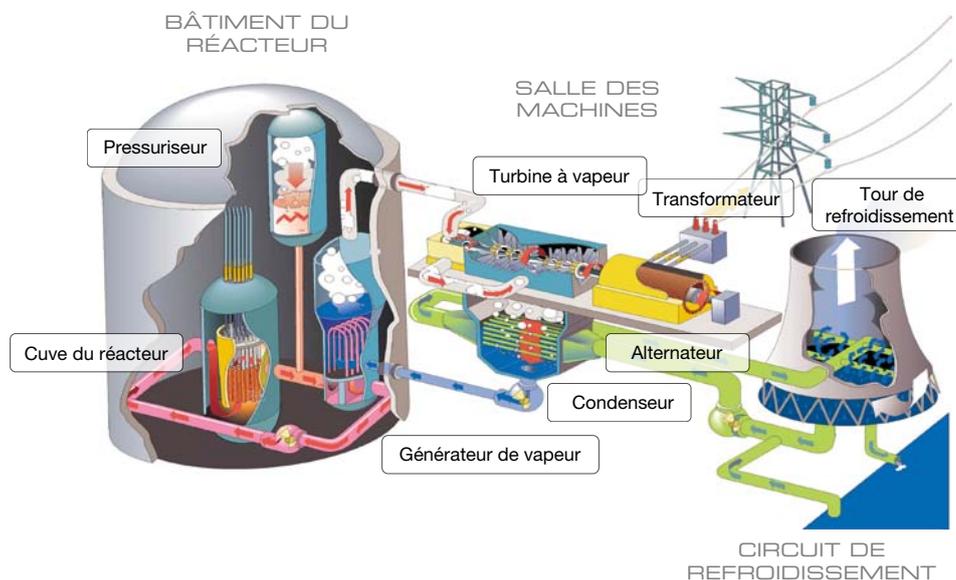
cylindriques composés de milliers de tubes ayant la forme d'un U renversé et soudés sur une plaque tubulaire). L'eau de ce dernier est alors transformée en vapeur. Les deux circuits sont séparés hermétiquement l'un de l'autre.

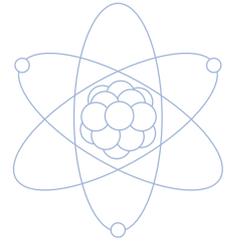
La vapeur produite se détend ensuite au travers de plusieurs corps de turbine qui entraînent un alternateur. C'est ce dernier qui transforme l'énergie mécanique en électricité, qui alimentera le réseau haute tension.

Après avoir actionné les turbines, la vapeur est "aspirée" par la dépression créée dans le condenseur. Au contact des milliers de tubes qui le constituent, cette vapeur est "condensée" grâce à l'eau froide (qui peut provenir d'un cours d'eau ou de la mer) d'un circuit tertiaire. L'eau du circuit secondaire est ensuite réacheminée vers les générateurs de vapeur.

Commune aux centrales thermiques classiques et nucléaires, la tour de refroidissement sert, comme son nom l'indique, à refroidir l'eau (d'un cours d'eau ou de la mer) du circuit tertiaire grâce à une circulation d'air naturelle. L'eau refroidie peut éventuellement être réutilisée dans le condenseur. Seul 1,5% de cette eau, non radioactive, s'échappe de la tour de refroidissement sous forme de vapeur: c'est ce qu'on appelle communément le panache, ce qui est considéré à tort comme une pollution radioactive.

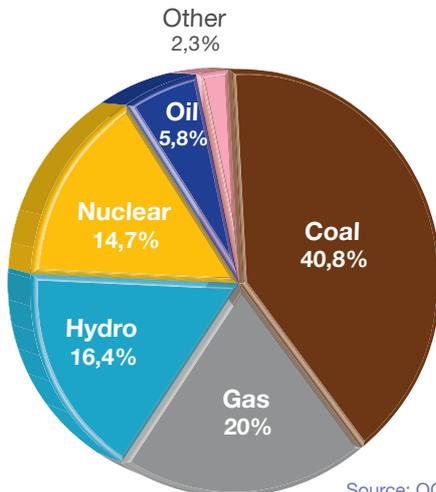
Schéma d'une centrale nucléaire PWR





## PRESSURISED WATER REACTOR: LA FILIÈRE LA PLUS IMPORTANTE

Mi-2009, on comptait 436 réacteurs en service dans le monde, répartis dans 30 pays et représentant une capacité installée de 372 000 Mégawatts, ainsi que 45 installations en construction<sup>10</sup>. Ils assurent presque 15% de la production mondiale totale d'électricité. Ils appartiennent à différentes familles ou filières.



Source: OCDE/AIE 2006

Une filière se caractérise par l'ensemble des techniques mises en œuvre pour produire de l'électricité dans un réacteur nucléaire. Trois constituants la définissent : le combustible, le modérateur (matière ralentissant les neutrons) et le fluide caloporteur. Ils appartiennent à différentes familles ou filières.

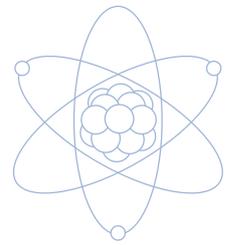
La filière PWR représente 75% de l'électricité produite par les réacteurs nucléaires en activité dans l'Union européenne et 61% dans le monde. Un autre type de filière importante (qui représente 21% de l'électricité produite par les réacteurs nucléaires en activité dans le monde) est la filière BWR (Boiling Water Reactor ou réacteur à eau bouillante). On trouve ensuite d'autres réacteurs (18% du parc mondial) comme les GCR (Gas Cooled Reactor), PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor, appelé aussi CANDU), FBR (Fast Breeder Reactor), RBMK (ou LWGR pour Light Water Graphite Reactor).

## NUCLEAR POWER PLANTS INFORMATION OPERATIONAL & LONG TERM SHUTDOWN REACTORS BY TYPE

Operational		
Type	No of Units	Total MW (e)
BWR	92	83656
FBR	2	692
GCR	18	8909
LWGR	16	11404
PHWR	44	22441
PWR	264	243121
<b>Total</b>	<b>436</b>	<b>370221</b>

Above data from PRIS database (IAEA). Last updated on 2009/05/06

10. Source: PRIS (Power Reactor Information System) - AIEA



## L'HISTOIRE NUCLÉAIRE BELGE

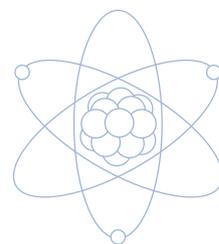
La Belgique fait partie des pionniers dans le développement de l'énergie nucléaire. Si elle est entrée par hasard dans l'histoire atomique via les mines du Congo grâce d'abord au radium et ensuite à l'uranium, elle a ensuite participé à l'essor extraordinaire qu'a connu l'atome dans les années 50 et 60. C'est au sein du Centre d'Etudes de l'Energie Nucléaire (CEN•SCK) que se sont réalisées la plupart des premières expériences nucléaires belges. Le 11 mai 1956, la première réaction en chaîne contrôlée est obtenue avec le réacteur de recherche BR 1 (Belgian Reactor 1) qui est toujours en activité à Mol. La Belgique est le troisième pays en Europe occidentale, après la Grande-Bretagne et la France, à avoir obtenu la divergence d'un réacteur (établissement dans un réacteur d'une réaction nucléaire en chaîne). Très rapidement après ce premier succès, la Belgique décide de construire et d'exploiter un réacteur d'essai de matériaux (BR 2) ainsi qu'un réacteur nucléaire expérimental de puissance dans le but de produire de l'électricité (BR 3).

Mis en service en 1961, le BR 2 est utilisé dans la recherche sur le comportement des matériaux de réacteurs et des combustibles sous irradiation. Il produit aussi des radio-isotopes à des fins médicales et industrielles. Cette activité se poursuit ensuite à l'Institut National des Radioéléments à Fleurus, qui jouit aujourd'hui d'une renommée internationale dans le domaine. En 1962, ce sera au tour du premier réacteur producteur d'électricité belge, le BR 3, d'être mis en service. L'intention à l'origine était de l'installer sur le site de l'Expo 58 à Bruxelles. D'une puissance de 11,2 MWe, il est raccordé au réseau en octobre 62. Ce premier réacteur européen à eau pressurisée (hors Etats-Unis) dont l'exploitation était assurée par des producteurs d'électricité allait, entre autres, permettre de former à l'origine le personnel des futures centrales de Doel et Tihange. A partir de 1963, il servira également à tester en conditions réelles du

combustible MOX (Mélange d'Oxydes d'uranium et de plutonium - voir le chapitre 6 consacré au cycle du combustible). En 1987, il est définitivement mis à l'arrêt après 11 cycles de fonctionnement. Le BR 3 n'est pas pour autant tombé dans les oubliettes; en effet, il a été désigné comme installation pilote pour la recherche sur le démantèlement des réacteurs par la Commission Européenne, démantèlement effectué en grande partie.

A l'époque du démarrage des premiers réacteurs, la production électrique en Belgique était assurée aux trois quarts par le charbon, dont une grande partie provenait des mines belges. Mais déjà s'amorçait le déclin des charbonnages et en parallèle la consommation d'électricité ne cessait de croître. De 1950 à aujourd'hui, la consommation mondiale d'électricité a été multipliée par douze. Cette croissance s'est opérée en deux phases: rapide jusqu'en 1973 (premier choc pétrolier), ralentie ensuite. Clé de voûte du développement industriel en Europe au dix-neuvième siècle et durant la première moitié du vingtième, le charbon a été progressivement remplacé par d'autres sources d'énergie dès les années 60.

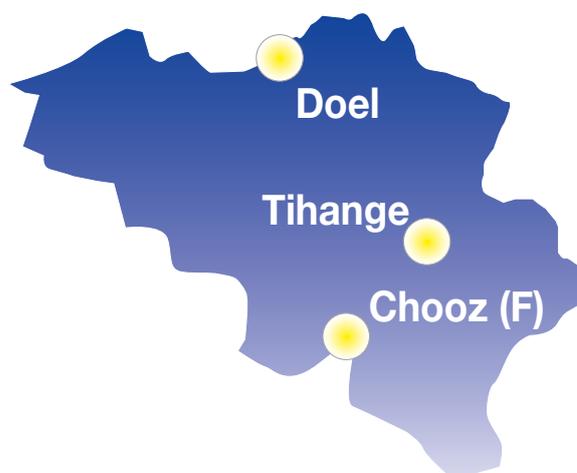
Or, pour la production d'électricité, l'uranium apparaît rapidement aux yeux des responsables comme une solution de remplacement au charbon national. Les quantités d'électricité que le nucléaire est susceptible de produire permettaient d'envisager l'avenir sereinement. La première centrale nucléaire commerciale réalisée par les belges en collaboration avec les Français est localisée dans la botte de Givet, à Chooz, en bord de Meuse. Cette centrale PWR (Pressurized Water Reactor - Réacteur à eau pressurisée) dont le réacteur est le plus puissant au monde à l'époque (242 MWe) commencera à fournir de l'électricité au réseau en 1967. Il a été mis à l'arrêt définitif en 1991.



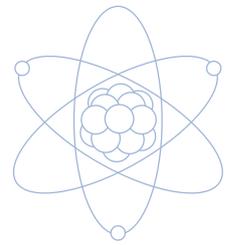
La centrale de Chooz, appelée Chooz A, a permis aux Belges et aux Français d'acquérir un savoir-faire et de l'expérience à la fois dans la fabrication de matériel destiné à équiper les futures installations nucléaires mais également dans la gestion d'une centrale. Après la mise en service de Chooz A, les Belges décident de lancer leur programme électronucléaire. Deux sites sont retenus : Doel sur la rive gauche de l'Escaut en aval d'Anvers et le zoning industriel de Tihange sur la rive droite de la Meuse, en amont de Liège. Les premiers réacteurs ont été mis en service industriellement en 1975 (Doel 1, Doel 2 et Tihange 1). A ces trois unités, s'ajouteront entre 1982 et 1985, Doel 3, Tihange 2, Doel 4 et Tihange 3.

En 1973, année du choc pétrolier, la production d'électricité en Belgique était assurée à 52% par le pétrole et à 0,2% par le nucléaire (fournie par le BR 3). Dans les années 80, la part du nucléaire tournait en moyenne autour de 66%. C'était l'époque où le nucléaire éclairait deux lampes sur trois en Belgique.

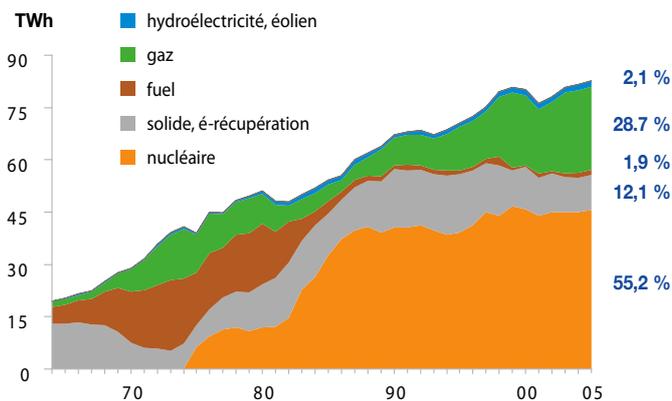
### Les parcs nucléaires de Doel, Tihange et Chooz



Tranche	Mise en service	Puissance développable	Combustible
<b>Zone de production nucléaire de Doel</b>		<b>2839,5 MW</b>	
Doel 1	1975	392 MW	UO <sub>2</sub>
Doel 2	1975	433 MW	UO <sub>2</sub>
Doel 3	1982	1006 MW	UO <sub>2</sub> et MOX
Doel 4	1985	1008 MW	UO <sub>2</sub>
<b>Zone de production nucléaire de Tihange</b>		<b>2985 MW</b>	
Tihange 1	1975	962 MW	UO <sub>2</sub>
Tihange 2	1983	1008 MW	UO <sub>2</sub> et MOX
Tihange 3	1985	1015 MW	UO <sub>2</sub>



## Evolution des combustibles utilisés dans les centrales électriques en Belgique de 1964 à 2005



### La situation politique en Belgique et en Europe

#### La Belgique

En février 2003, la loi qui transcrit la volonté du gouvernement belge d'arrêter la production d'électricité au moyen des centrales nucléaires en Belgique a été publiée au Moniteur belge. Pratiquement, la nouvelle loi prévoit la fermeture des 7 réacteurs nucléaires en service en Belgique (fission) après une durée maximale de 40 ans à partir de la date de leur première mise en service, soit en 2015 pour les premiers réacteurs que sont Doel 1/2 et Tihange 1 et en 2025 pour les derniers. Toutefois, la loi stipule qu'une exception peut être accordée en cas de "force majeure" (pour cause de sécurité d'approvisionnement énergétique par exemple).

Il est important de rappeler qu'il s'agit là d'une **décision politique**. En effet, aucune durée de vie légale n'est mentionnée dans les autorisations

d'exploitation pour les centrales nucléaires belges<sup>11</sup>. Un certain nombre de personnes s'interrogent sur le réalisme de cette décision. Tout d'abord parce qu'elle ne prévoyait aucune alternative crédible à la production électrique nucléaire (qui représente 55 % de la production belge), mais également parce qu'elle aurait des conséquences négatives pour la Belgique, que ce soit au niveau économique, environnemental (Kyoto), ou de la sécurité d'approvisionnement.

#### Est-il possible de satisfaire la demande d'électricité en Belgique sans le nucléaire?

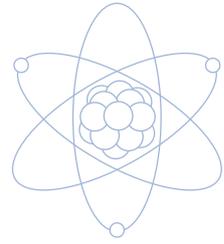
En théorie, c'est possible. Cependant, même en supposant l'exploitation maximale des énergies renouvelables (10 % à l'horizon 2020 selon la commission AMPERE<sup>12</sup>), presque 90% de la production électrique belge proviendra du gaz et du charbon qui produisent des émissions de gaz à effet de serre et augmentent la dépendance énergétique de notre pays.

#### Et en Europe (situation 2006)?

**La filière nucléaire fournit 31 % de l'électricité de l'Europe**, dont sept pays ne disposent pas de nucléaire. Certains pays ont adopté un programme de retrait, c'est le cas de l'Italie, l'Allemagne, la Suède et la Belgique. D'autres ont opté pour un moratoire sur de nouvelles capacités: Espagne et Grande-Bretagne. La Finlande, la France, la Belgique de leur côté, ont décidé la construction de nouveaux réacteurs et la Roumanie a démarré en 2007 un réacteur. Il est à noter que les pays européens qui ont opté pour un retrait du nucléaire n'ont pas d'alternatives valables qui permettent un approvisionnement énergétique sûr et respectueux de l'environnement.

11. Toutefois, les exploitants sont tenus de se soumettre à un "examen" de sûreté tous les 10 ans. Il s'agit d'une révision approfondie, au cours de laquelle les installations sont inspectées et, si nécessaire, adaptées à l'évolution technique, aux normes et prescriptions en vigueur, ce qui requiert d'importants investissements.

12. La Commission Analyse des Modes de Production de l'Electricité et Redéploiement des Energies a été mise en place par le gouvernement en 1999 et étaient composées de scientifiques et experts belges reconnus.

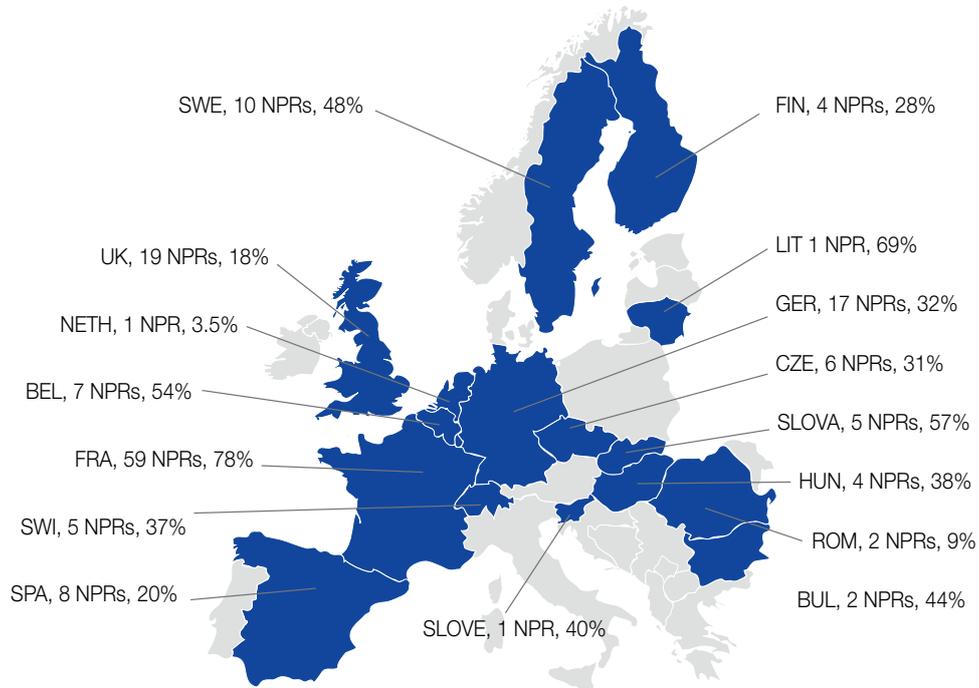


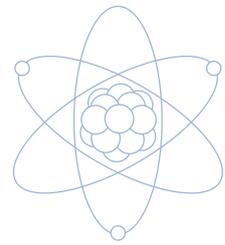
L'exemple le plus frappant est celui de la Suède. En 1980, un référendum populaire y était organisé. Le pays décidait de sortir du nucléaire dans les dix ans, en le remplaçant par des économies d'énergie et un recours accru aux énergies renouvelables. En 1999, bien que ces conditions ne soient pas rencontrées, la société Sydkraft était obligée, par décision politique et après dédommagement, d'arrêter la centrale 1 (600 MW)

de Barsebäck. Depuis cette fermeture, la Suède importe 4 milliards de kWh par an en provenance de centrales au charbon (produisant beaucoup de CO<sub>2</sub>) et a reporté à une date non précisée l'arrêt, prévu pour juillet 2001 au plus tard, de la centrale Barsebäck 2. L'opérateur d'énergie de l'Etat suédois prévoit même d'investir 1,9 milliards de dollars dans les mises à niveau des réacteurs au cours des 15 prochaines années.

### Situation en Europe

(source : World Nuclear Association (% GWh 2006, réacteurs exploités en 2008))





Le 1<sup>er</sup> mai 2004, dix pays d'Europe Centrale, d'Europe de l'Est et du Sud sont venus renforcer l'Union européenne. Les frontières extérieures de l'UE se sont étendues vers l'est jusqu'à l'Estonie, la Hongrie, la Lettonie, la Lituanie, la Pologne, la Slovénie, la Slovaquie et la République tchèque. Vers le sud jusqu'à Chypre et Malte. Dans cinq de ces nouveaux Etats membres, une partie de l'électricité est produite à partir de l'énergie nucléaire,

ce qui porte à treize le nombre d'Etats membres "nucléarisés".

Malgré des programmes de modernisation et suite aux négociations d'accession avec l'Union européenne, les réacteurs de première génération seront progressivement mis hors service, c'est notamment le cas de la Lituanie (fermeture de ses deux seuls réacteurs) et de la Slovaquie.

## LE RÔLE DU NUCLÉAIRE EN BELGIQUE

Le nucléaire représente 55% de la production d'électricité en Belgique (2009), c'est-à-dire environ **l'équivalent de toute la consommation industrielle, plus 20% de la consommation résidentielle du pays**. Le nucléaire constitue donc une importante source d'énergie même si sa part relative dans le mix énergétique belge tend à décroître au profit d'autres sources d'énergie (gaz et énergies renouvelables).

La production d'électricité d'origine nucléaire devrait encore fournir la moitié de notre électricité dans les années à venir.

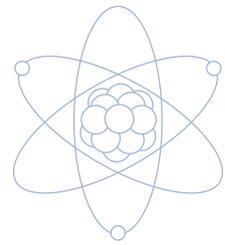
En quelques mots, le nucléaire électrique en Belgique, c'est aussi :

- **2 000 emplois directs** sur un total de 4 500 pour l'ensemble de l'industrie nucléaire
- **2 000 000 d'heures de travail en sous-traitance**, en moyenne par an
- **plus de 100 millions d'euros d'investissements annuels**.

## Approvisionnement énergétique

Le nucléaire peut être considéré comme une source d'énergie sûre, fiable pour notre approvisionnement énergétique. Les réserves d'uranium sont réparties dans des régions diverses et essentiellement stables: Australie, Amérique du Nord, Afrique et Asie centrale. Par ailleurs, le combustible peut facilement être stocké à des prix raisonnables de telle sorte que les centrales disposent toujours d'une réserve. En Belgique, conformément à la norme Euratom, on a toujours en stock une réserve pour deux ans. Cette répartition garantit à la fois la sécurité et la diversité des approvisionnements. Ceci est particulièrement vrai en cas de rupture inopinée d'approvisionnement en combustibles fossiles. Or, les risques existent si l'on sait que les principales réserves sont concentrées dans des régions potentiellement instables, comme le Moyen-Orient. D'un point de vue stratégique, l'énergie nucléaire signifie pour l'Europe et particulièrement l'Europe occidentale un facteur important de stabilité et donc d'indépendance énergétique là où, justement, l'on ne dispose pas de réserves fossiles suffisantes.

Il est bon de rappeler qu'à l'intérieur de l'Europe des 25, il existe également des réserves d'uranium (France, Espagne, Bulgarie, Roumanie, etc.) dont on a cessé l'exploitation pour des raisons économiques, au moment où le prix de l'uranium s'effondrait.



### Economie de combustibles fossiles

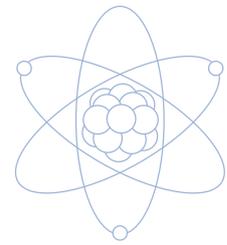
Le potentiel énergétique de l'uranium est grand. Ainsi, pour produire 100 000 kWh, il faut 35 000 kg de charbon, 25 000 litres de mazout, 30 000 m<sup>3</sup> de gaz naturel ou 400 grammes d'uranium. La production d'une centrale nucléaire de 1000 MWe pendant une année calendrier (8760 heures) est de 8,76 milliards de kilowattheures, ce qui correspond à un volume de 1 880 000 TEP (tonnes équivalent pétrole) ou 2 690 000 TEC (tonnes équivalent charbon)! En tenant compte que 45 milliards

de kilowattheures sont d'origine nucléaire en Belgique, ce sont **près de 14 millions de tonnes de charbon qui sont économisées chaque année.**

Outre l'économie de combustible fossile, l'utilisation de l'énergie nucléaire permet d'éviter des transports parfois bien contraignants. Ainsi, une centrale de 1000 MW fonctionnant en continu nécessite par an 20 tonnes de combustible (1 camion par an) dans le cas du nucléaire, 2 500 000 tonnes (2 à 3 trains par jour) pour le charbon et environ 30 méthaniers de 130 000 m<sup>3</sup> dans le cas du gaz.

### Quantité de combustible requise pour produire 100 000 kWh

Charbon	Fuel	Gaz naturel	Uranium enrichi
35 000 kg	25 000 l	30 000 m <sup>3</sup>	400 g



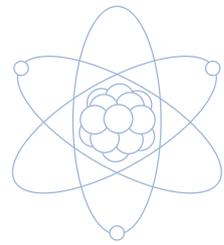
### Du nucléaire pour combien de temps ?

Nous prendrons comme référence le "Livre rouge" (OCDE/AIEA), qui suit et analyse le marché de l'uranium depuis 1965, en partant de différents points de vue et hypothèses, tant en ce qui concerne l'offre que la demande d'uranium. Une première constatation: pour une production d'électricité par l'énergie nucléaire égale à celle de 2004, les sources conventionnelles identifiées (en 2005) suffisent pour l'approvisionnement mondial des unités nucléaires pour les **85** ans à venir. Si l'on prend un autre critère pour l'offre d'uranium, par exemple la somme tant des stocks identifiés que des stocks prouvés et des stocks supposés, les réserves exploitables suffisent déjà pour **270** ans. Si l'on va encore plus loin en matière d'offre et que l'on tient également compte des sources non conventionnelles et de l'uranium issu de sources secondaires, de phosphates par exemple,

le rapport parle alors d'un délai garanti de **675** ans. Ceci sans parler de l'uranium issu du retraitement et recyclage du combustible déjà utilisé. Et n'oublions pas non plus l'évolution technologique: les nouveaux types de réacteurs nucléaires que nous pourrions voir à l'avenir auront besoin de beaucoup moins d'uranium pour produire la même quantité d'électricité. Enfin, on peut même extraire de l'uranium de l'eau de mer, ce qui rend alors l'approvisionnement quasi illimité, ou bien on peut utiliser du thorium à la place de l'uranium dans le cycle du combustible nucléaire destiné à la production d'électricité. Par ailleurs, il y a les réserves inconnues de minerais d'uranium, stocks qui sont en partie supposés mais pas encore exploités, et les réserves qui ne sont pas encore connues à ce jour. L'approvisionnement est donc bel et bien assuré sur le long terme. On dispose donc de réserves pour des centaines d'années, même s'il devait y avoir une augmentation considérable de la consommation.

<b>Technologie</b>	<b>Années</b> (sur base production électrique 2004) <b>avec ressources identifiées</b>	<b>Années</b> (sur base production électrique 2004) <b>avec total des ressources conventionnelles</b>	<b>Années</b> (sur base production électrique 2004) <b>avec total des ressources conventionnelles + phosphates</b>
"Classique" (comme PWR)	85	270	675
Réacteur "rapide" avec recyclage du combustible	2 570	8 015	19 930

Source: "Uranium 2005: Ressources, Production et Demande" (AIEA/OCDE)



## Environnemental

La production de l'électricité d'origine nucléaire **ne rejette pas de gaz ou de particules qui contribuent à l'effet de serre**, acidifient les pluies ou appauvrissent la couche d'ozone. Sa chaîne complète - extraction de l'uranium, fabrication du combustible, construction, exploitation, démantèlement du réacteur et gestion des déchets - émet à peu près le même volume d'équivalent carbone par kWh que l'énergie éolienne ou l'hydroélectricité.

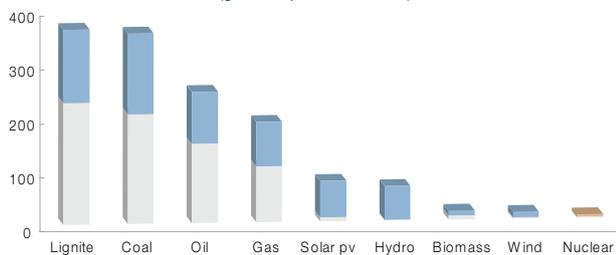
Dans notre pays, l'émission de CO<sub>2</sub> par kilowattheure produit est, grâce au nucléaire, une des plus faibles d'Europe (279 g par kWh en 2004). Ce résultat n'est atteint que par certains pays recourant également à

l'énergie nucléaire et/ou disposant de capacités d'énergies hydrauliques importantes.

Les émissions de CO<sub>2</sub> liées à la production électrique en Belgique s'élèvent à +/- 20 millions de tonnes par an; sans l'énergie nucléaire, elles atteindraient presque 50 millions de tonnes par an. En effet, l'énergie nucléaire permet **d'éviter la production d'environ 30 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par an, soit l'équivalent des rejets de tout le parc automobile belge.**

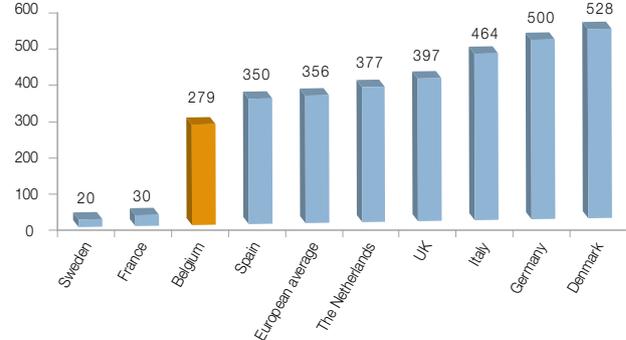
**Selon l'Union Européenne, le nucléaire permet en Europe (des 25) d'éviter près de 700 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> chaque année, ce qui représente la production CO<sub>2</sub> de tous les véhicules de transport de passagers dans l'Union!**

**Emissions de gaz à effet de serre**  
(gCO<sub>2</sub>-équivalent/kWhe)



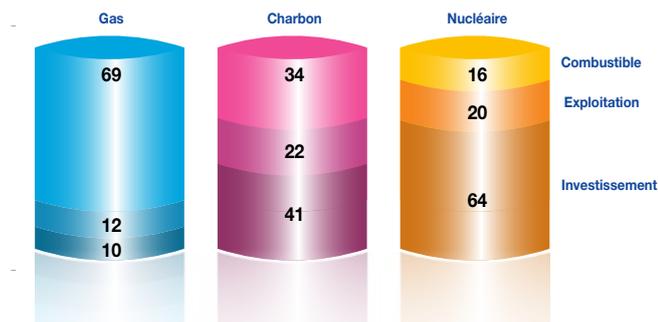
Source : données communes de l'AEN et de l'AIEA.

gCO<sub>2</sub> / kWhe

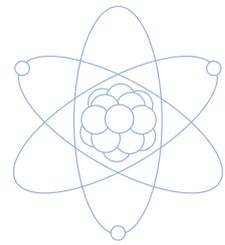


## Structure de coût par combustible

Production électrique (en %)



Source : Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie



### Economique

Le coût de l'énergie en général et de l'électricité en particulier est à la fois une composante importante de la vie moderne et un facteur de compétitivité pour les entreprises. De par sa structure sectorielle, cette compétitivité est particulièrement importante pour l'industrie belge, forte consommatrice d'énergie et qui représente un emploi considérable.

Il existe bien de nombreuses études économiques réalisées de par le monde qui comparent les coûts de production de différents moyens de production d'électricité; il est malheureusement extrêmement difficile d'en prendre une comme référence tant les hypothèses diffèrent et les paramètres ont évolué rapidement dans le temps, en particulier au cours de ces dernières années. C'est pour cette raison que nous nous attachons juste à reproduire ci-après certains constats, les plus objectifs possibles.

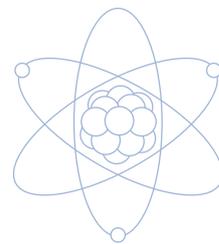
Il est important de rappeler que l'attractivité d'une énergie dépend d'abord du contexte lié à chaque région du monde. Ainsi, l'électricité produite au charbon est généralement plus économique dans les régions telles que le nord de la Chine, le Midwest des Etats-Unis et l'Australie, où le charbon est abondant et les émissions de carbone ne sont que très peu (voire pas) pénalisées. Dans les régions distantes des combustibles fossiles telles que le Japon, la Chine côtière, la France ou la Belgique, le coût élevé du transport de ces combustibles rend le nucléaire attrayant.

D'une façon générale, le marché fait que les coûts globaux de production de nouvelles unités nucléaires, au gaz ou au charbon sont équivalents.

Dans les prochaines années, plusieurs facteurs vont déterminer la position concurrentielle du nucléaire par rapport à celle d'autres sources d'énergie, citons :

- les coûts d'investissement, qui ont une incidence importante (pénalise le nucléaire) car ils représentent, pour le nucléaire, environ 60% du coût de l'électricité produite (environ 20% dans le cas du gaz et 40 à 50% dans le cas du charbon);
- le coût des combustibles fossiles, dont le gaz est très dépendant (60 à 80%, pour 40% dans le cas du charbon; le nucléaire n'étant dépendant des coûts de combustible qu'à hauteur de 15%, dont seulement 5%<sup>13</sup> liés directement à l'approvisionnement en uranium);
- la taxation des émissions de carbone, qui favorise le nucléaire;
- le besoin des industriels de disposer d'une visibilité à moyen et long terme sur les coûts énergétiques; en ce sens et outre son niveau de prix, il est clair que le nucléaire présente une grande visibilité des coûts sur le long terme, à un horizon pouvant aller jusqu'à la fin de vie des centrales.

13. Même une augmentation sensible de son prix n'aura pas une grande influence sur le coût de production de l'électricité d'origine nucléaire.



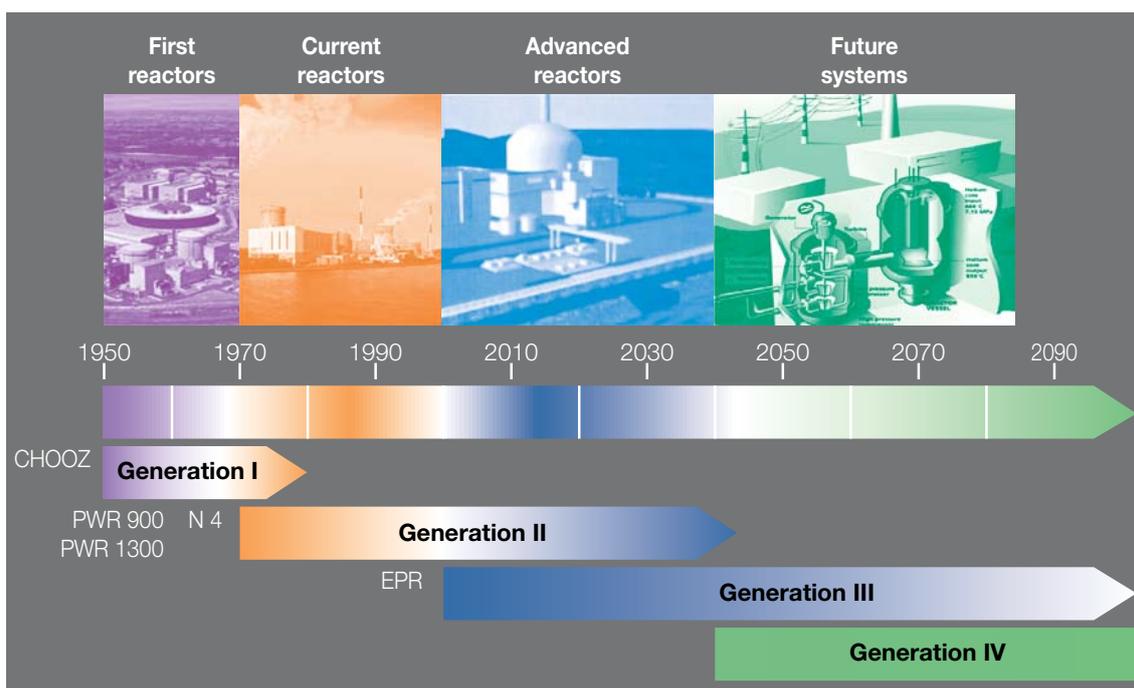
## L'AVENIR

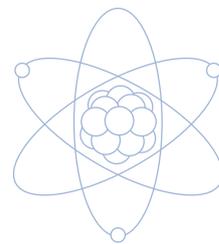
Le secteur nucléaire est caractérisé par des propositions pour le court terme et des projets pour le long terme. Pour les nouveaux types de réacteurs, on distingue les réacteurs évolutionnaires des réacteurs révolutionnaires.

Les premiers sont déjà en construction (Finlande, France et Chine) pour une mise en service à un horizon rapproché. Les premiers sont déjà en construction (Finlande, France et Chine) pour une mise en service à un horizon rapproché. Ce sont des réacteurs dérivés des réacteurs actuellement en fonctionnement, conçus selon les mêmes principes et capitalisant l'expérience acquise pendant plusieurs dizaines d'années sur un nombre de réacteurs importants. Ces réacteurs dits évolutionnaires sont aussi désignés sous l'appellation de réacteurs de la **Génération III ou de réacteurs pour 2015**. Au contraire, les seconds, les réacteurs dits **révolutionnaires ou de Génération IV**, en évolution technique majeure avec les réacteurs actuels, correspondent à une mise en service **vers 2035**.

## A court terme, la Génération 2015

On parlera ainsi de réacteurs de Génération 2015 pour désigner les réacteurs qui pourront entrer en service commercial à cette date pour renouveler les parcs actuellement en service. Ils constituent un perfectionnement de la génération précédente et sont optimisés en fonction de la réglementation la plus récente. Les évolutions les plus avancées de ces réacteurs, comme l'ABWR (Advanced Boiling Water Reactor) de General Electric, sont déjà en service. L'EPR (European Pressurized Water Reactor) d'AREVA et l'AP 1000 (Advanced Passive Pressurized Water Reactor) de Westinghouse BNFL (USA-UK), sont en construction en Europe, en Chine et aux Etats-Unis.





### L'EPR et l'AP 1000: des réacteurs à eau pressurisée plus sûrs et plus performants que leurs prédécesseurs.

Ces types de réacteurs présentent un ensemble d'innovations qui ont pour but d'accroître encore leur sûreté en tant que réacteurs à eau pressurisée, tout en améliorant leurs performances d'exploitation et donc leur taux de disponibilité. En matière de sûreté, l'accent est mis bien davantage sur la prévention que sur la neutralisation des conséquences. Dès la conception, les dispositions nécessaires sont prises afin de prévenir les "accidents graves". La protection contre les agressions externes a également été améliorée (les centrales belges servant de modèle!). L'AP 1000 offre un avantage économique par une simplification imposée: moins de composants et un temps de construction accéléré grâce à l'utilisation de modules fabriqués en usine et assemblés sur place.

## AP 1000 - Concept

### A moyen terme, la Génération 2035 multi-usages

Avec le long terme pour horizon, les réacteurs étudiés actuellement ont en commun de ne pas encore être opérationnels (bien que certains prototypes aient été construits) et de devoir faire l'objet de travaux importants de recherche et développement et de tests, à une échelle réduite ou industrielle. C'est pourquoi l'on désignera l'ensemble de ces projets sous le nom de Génération IV.

### Objectifs : production d'électricité, d'hydrogène et dessalement d'eau de mer

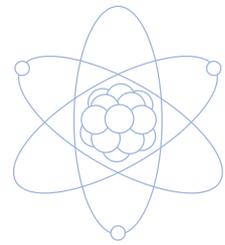
Pour assurer leur succès, les réacteurs du futur devront s'ouvrir à de nouveaux marchés, grâce à de nouvelles applications comme la production d'hydrogène<sup>14</sup> ou le dessalement d'eau de mer<sup>15</sup> pour de grandes agglomérations urbaines. Ils devront aussi s'inscrire dans une perspective de développement durable en consommant le combustible avec un meilleur rendement que les réacteurs actuels tout en produisant moins de déchets.

### L'état des recherches en cours

Les premiers projets à avoir marqué l'actualité nucléaire sont les projets de réacteurs modulaires à haute température (environ 800°C) fonctionnant avec de nouveaux types de combustible – boulets ou éléments combustibles constitués de microbilles de matière fissile, galets ou billes d'uranium – et refroidis au gaz; on trouve essentiellement deux filières (Pebble Bed Modular Reactor et Gas Turbine Modular Helium Cooled Reactor). Après, une seconde vague de projets a été lancée à l'initiative du Département de l'Energie (DOE) des Etats-Unis en 2001, intitulée Generation IV Nuclear Energy Systems Initiative, qui a réussi à fédérer autour de lui un ensemble d'organismes de recherche nucléaire de 10 pays dans une structure de coopération informelle appelée le GIF (Generation IV International Forum). Six systèmes réacteurs-combustibles ont été sélectionnés par le GIF; pour faire simple, on peut dire qu'il y a un réacteur à eau légère, un réacteur à très haute température (jusqu'à 1100 °C) refroidi au gaz, trois réacteurs à neutrons rapides qui permettent d'économiser d'un facteur 100 les ressources disponibles<sup>16</sup> et un réacteur à sels fondus qui est très économe en consommation de combustible (thorium-uranium).

14. Propre et ne dégageant pas de gaz à effet de serre lors de sa combustion, l'hydrogène, le principal carburant des piles à combustible, est promis à un bel avenir. La chaleur des centrales du futur pourrait ainsi alimenter sa production par électrolyse à haute température ou craquage thermochimique de l'eau.

15. Indispensable à la vie, l'eau potable s'annonce comme l'une des grandes ressources menacées de pénurie. Les chercheurs réfléchissent donc aux moyens d'associer la production d'électricité à des systèmes de dessalement de l'eau de mer par distillation ou osmose inverse. Or, selon les estimations en cours, la cogénération d'électricité et d'eau dessalée avec le nucléaire s'avérerait plus rentable que l'utilisation des énergies fossiles. Associée à un réacteur de 200 MW thermiques, la distillation permettrait d'obtenir jusqu'à 43 000 m<sup>3</sup> d'eau par jour. Cela, sans impact sur la production d'électricité et à un coût marginal.



### Et que fait la Belgique?

Le SCK•CEN souhaite contribuer à l'évolution vers une mise en œuvre durable de l'énergie nucléaire par la construction d'une nouvelle installation de recherche, qui sera utilisée entre autres dans la recherche sur les matériaux et le combustible des réacteurs futurs. Ce système innovant, appelé MYRRHA, repose sur un réacteur rapide refroidi au plomb selon la technologie ADS. Cette technologie implique un accélérateur de particules permettant de transformer des substances radioactives à longue vie en éléments à vie courte, ce qui va permettre de limiter de façon drastique la quantité de déchets hautement radioactifs. Ce projet permettra également de démontrer l'industrialisation de la technologie de Génération IV. Le début des travaux de construction est prévu pour 2014 et l'exploitation pour 2020.

### A très long terme, la fusion thermonucléaire contrôlée?

La fusion de deux noyaux légers en un noyau plus lourd<sup>17</sup> est source<sup>18</sup> 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 de l'immense production d'énergie créée au sein du soleil et des étoiles<sup>19</sup>. Contrairement à la fission qui met en jeu une particule neutre, la fusion fait intervenir des particules chargées de même signe exerçant entre elles des forces de répulsion. Pour surmonter ces

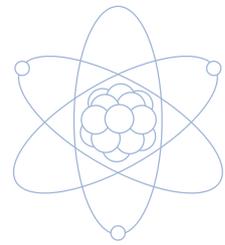
forces et mettre les noyaux concernés "en présence", à des distances telles que le mécanisme de fusion soit enclenché, il faut élever la température du milieu (appelé plasma) à des valeurs très élevées: quelques dizaines de millions de degrés. Différentes possibilités existent pour "confiner" le plasma : 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. Si celui-ci était parfaitement maîtrisé, l'humanité disposerait d'une source d'énergie quasi inépuisable. Dans la fusion nucléaire appliquée aux réacteurs de fusion, un noyau de deutérium (hydrogène avec 1 neutron) et un noyau de tritium (hydrogène avec 2 neutrons) sont transformés en un noyau d'hélium, énergie, et un neutron. Les combustibles envisagés (le deutérium et le tritium) sont très abondants. Ils peuvent garantir une production d'énergie pour des millions d'années. Le deutérium est présent notamment dans l'eau de mer. De plus, il n'y a pas de déchets à longue demi-vie produits. Malheureusement il est impossible de prédire le prix aujourd'hui. En particulier, la compétitivité économique de la fusion dans l'avenir, dépendra étroitement du coût des autres moyens de production d'électricité.

16. Avec des neutrons dits "thermiques" (ou ralentis), seule une petite fraction du combustible (les deux tiers de l'uranium 235, lui-même ne représentant que 4 % maximum du combustible) contribue à la production d'énergie. Et, au bout du compte, l'uranium 238 (seuls les isotopes impairs sont fissiles avec des neutrons thermiques), qui constitue 95% du combustible des centrales et 99% de l'uranium naturel, n'aura presque pas été utilisé. La solution pour éviter cela: les neutrons rapides. Ces particules ont en effet la propriété de pouvoir convertir l'uranium 238, un matériau dit fertile, en plutonium 239, un matériau fissile et donc apte à produire de l'énergie. Comme l'uranium 238 est le plus abondant des isotopes naturels et que des stocks ont été constitués à partir du retraitement du combustible usé des réacteurs actuels (séparation du plutonium et de l'uranium non brûlé des déchets) pourraient être utilisés. Faire appel aux neutrons rapides dans les centrales reviendrait à économiser d'un facteur 100 les ressources disponibles! Enfin, autre atout de ces véloces petits objets: ils brûlent certains déchets à vie longue et en limitent donc les quantités. Limitation des déchets et économie des ressources: deux avantages qui, du point de vue des participants au Forum International Génération IV, répondent aux critères du développement durable.

17. Plus précisément la fusion de deux noyaux de deutérium ou d'un noyau de deutérium et un noyau de tritium, en un noyau d'hélium.

18. La fusion libère beaucoup plus d'énergie que la fission (deux ordres de grandeur, soit un facteur 100).

19. C'est la gravité qui confine les noyaux légers et permet aux réactions de fusion d'avoir lieu à des températures de quelques millions de degrés. Sur Terre, il faut atteindre environ 50 millions de degrés et utiliser des champs magnétiques internes en lieu et place de la gravité.



La fusion fait l'objet de recherches avancées depuis le début des années 50, en particulier en Europe; combinés avec le retour d'expérience du projet JET<sup>20</sup> et d'autres réacteurs expérimentaux, ces efforts ont permis la conception d'un réacteur expérimental du type Tokamak<sup>21</sup>, portant le nom d'ITER<sup>22</sup>. L'objectif de ce projet international supporté par l'AIEA est de démontrer expérimentalement que la fusion nucléaire est crédible en tant que source d'énergie. Pour sa part, la Belgique n'est pas demeurée en reste dans ces programmes de développement de la fusion et nous

verrons également l'implication et la contribution de son industrie dans ceux-ci. 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 très long terme

La fusion, qui présente beaucoup d'avantages tant au niveau de la sûreté qu'au point de vue de l'impact sur l'environnement, est sans doute le moyen de production d'énergie du futur sur lequel repose le plus d'espoir dans la perspective d'un développement durable.

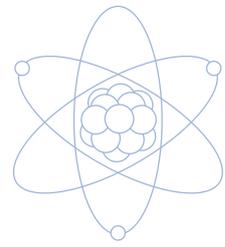
EPR - Olkiluoto



20. JET (Joint European Torus), laboratoire de recherche sur le plasma à Culham (Grande-Bretagne), qui a démontré la faisabilité scientifique de la fusion en 1991.

21. TOKAMAK (Russian Toroidalnaya Kamera y Magnitnaya Katucha), signifiant confinement du plasma par champs magnétiques dans un tore.

22. ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor).

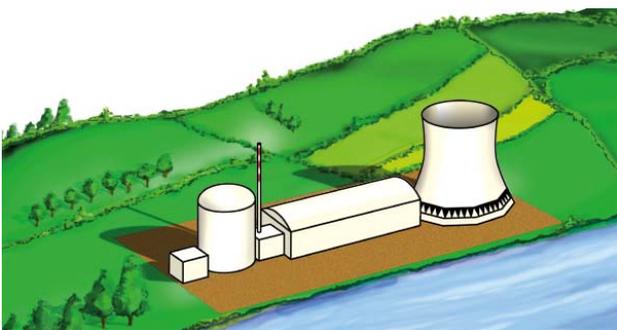


## LE DÉMANTÈLEMENT DES CENTRALES NUCLÉAIRES

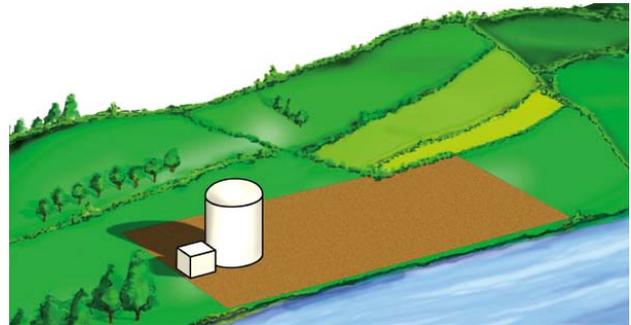
La vie d'une installation industrielle est jalonnée de différentes étapes, c'est également le cas d'une installation nucléaire. Lorsque l'arrêt de l'exploitation d'une centrale est décidé – les raisons peuvent être d'ordre politique, technique ou économique –, arrive la phase communément appelée de "démantèlement".

Le démantèlement d'une installation nucléaire regroupe l'ensemble des activités utilisant des techniques de démontage, de découpe et de démolition pour enlever les matériaux et structures ayant été en présence de matières radioactives. Le démantèlement se déroule en trois phases successives :

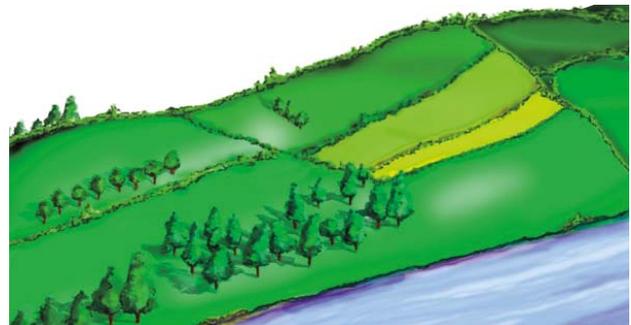
- Une phase de **mise à l'arrêt définitif** : le combustible est déchargé et les circuits sont vidangés, ce qui élimine 99,9% de la radioactivité. Les installations non nucléaires sont définitivement mises hors service et les systèmes et matériels qui ne sont plus requis pour la sûreté sont démontés.



- Une phase de **démantèlement partiel** : les bâtiments non nucléaires peuvent être réutilisés à d'autres fins ou démontés. La partie entourant le réacteur est isolée, confinée et mise sous surveillance.

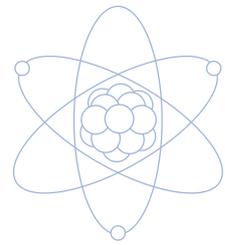


- Une phase de **démantèlement total** : le bâtiment réacteur, les matériaux et équipements encore radioactifs sont complètement démontés, conditionnés et évacués; la surveillance n'est plus nécessaire et le site peut être réutilisé.



Il existe deux types de politique en matière de démantèlement :

- **Démantèlement progressif** : l'installation est démantelée partiellement et son démantèlement complet différé à plusieurs dizaines d'années (entre 30 et 100 ans).
- **Démantèlement direct** : l'installation est démantelée complètement sans période d'attente.



La durée de l'opération de démantèlement peut donc s'étaler, selon la stratégie choisie, d'une à plusieurs dizaines d'années après la mise à l'arrêt définitif de la centrale nucléaire. Le choix de l'une ou l'autre stratégie a des implications aux niveaux économique, social, radiologique, de sûreté, de protection de l'environnement, politique, etc. La tendance actuelle est de s'orienter vers un démantèlement direct afin principalement de limiter la responsabilité des exploitants dans le temps.

Et le financement du démantèlement?

L'industrie nucléaire se préoccupe du devenir à long terme de ses installations. Dès l'origine du fonctionnement des centrales, il a été décidé de ne pas faire payer le coût du démantèlement aux consommateurs de demain, mais plutôt aux consommateurs d'aujourd'hui qui bénéficient du courant produit par les réacteurs en fonctionnement. **Ce coût est donc intégré dans le prix du kilowattheure.** Ainsi, l'entreprise provisionne les sommes collectées tout au long de la durée d'exploitation de ses centrales, afin de pouvoir en disposer au moment où elles seront mises à l'arrêt.

En Belgique, la constitution de provisions pour le démantèlement des centrales nucléaires a été organisée dès leur mise en exploitation et est maintenant régie par la loi du 11 avril 2003. Les modalités d'application pratiques sont confiées à une commission des provisions nucléaires composée de représentants gouvernementaux et du secteur électrique. Le montant des provisions est ajusté tous les trois ans, il inclut: les travaux de démantèlement, l'ingénierie, la surveillance et la maintenance des installations, la sécurité du site et la gestion complète des déchets.

Déjà des expériences?

Le démantèlement d'installations nucléaires est une réalité en Belgique depuis 1988, avec le démarrage des programmes de démantèlement de l'ancienne usine de retraitement EUROCHEMIC à Dessel par Belgoprocess et du premier réacteur à eau pressurisée d'Europe, le BR3 à Mol. Une expérience est aussi accumulée au niveau international à partir du démantèlement des centrales nucléaires plus anciennes.

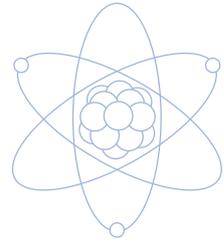


# Le cycle du combustible

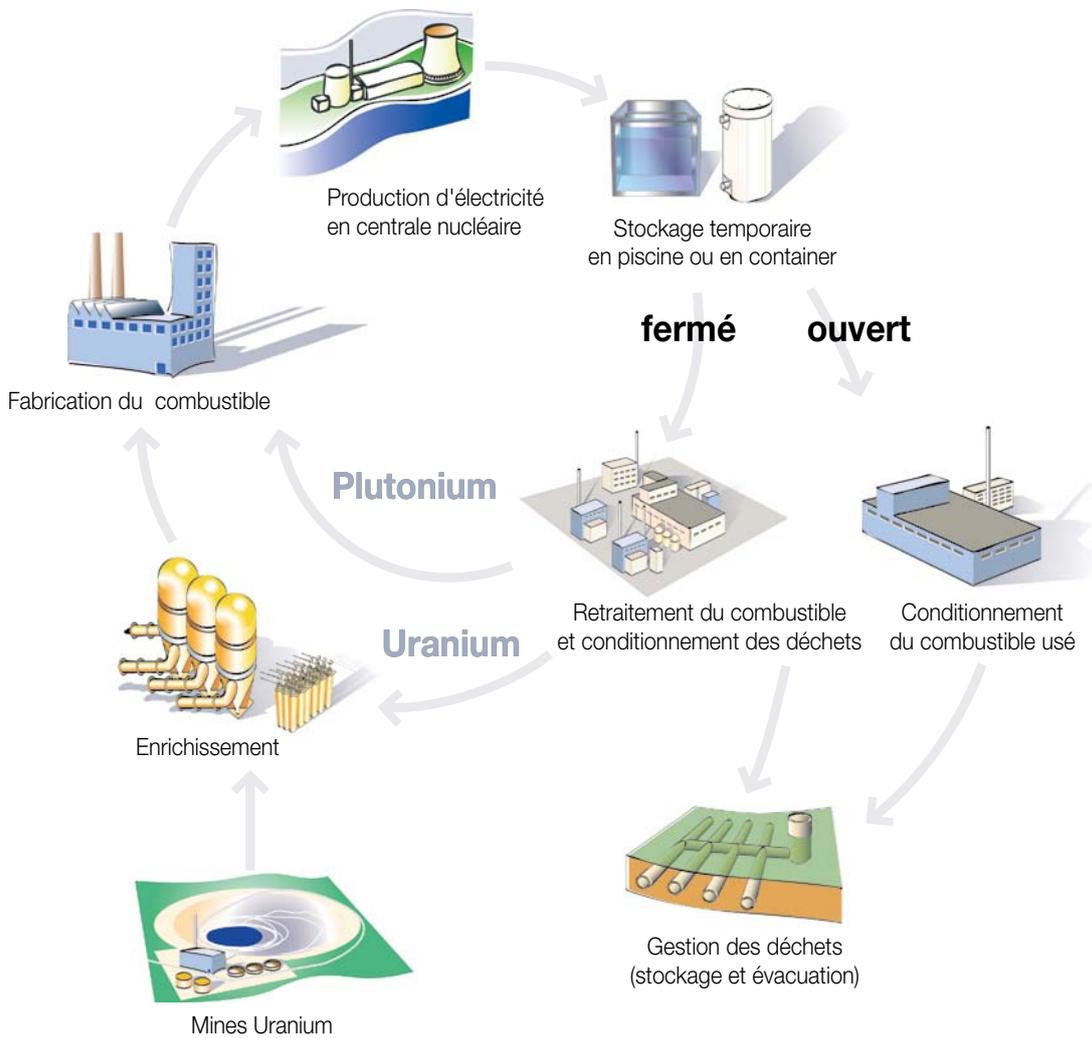
On désigne par "cycle du combustible nucléaire" l'ensemble des opérations liées au combustible nucléaire; outre l'utilisation du combustible dans un réacteur nucléaire, le cycle se décompose en deux parties que constituent respectivement les étapes avant et après l'utilisation du combustible dans un réacteur nucléaire, soit l'**amont** et l'**aval** du cycle du combustible nucléaire. **Ce cycle peut être soit fermé, soit ouvert.** Dans le premier cas, on **retraite** le combustible afin de recycler les matières<sup>23</sup> encore valorisables qu'il contient pour produire à nouveau de l'électricité; les déchets sont triés en différentes catégories, puis conditionnés (emballés) avant leur évacuation. Dans le second cas, on ne recycle pas les matières encore valorisables. Le combustible utilisé est d'abord stocké temporairement, puis définitivement, après conditionnement. Dans le second cas, on ne recycle pas les matières encore valorisables et le combustible utilisé est évacué après conditionnement, on parle alors d'**évacuation directe**. Le recyclage bénéficie d'une expérience internationale de plusieurs décennies, il est industriellement maîtrisé et les coûts sont connus. L'évacuation directe, quant à elle, est à l'état de projet: de nombreux aspects techniques et réglementaires ont déjà été définis et une estimation des coûts a été réalisée au niveau international.

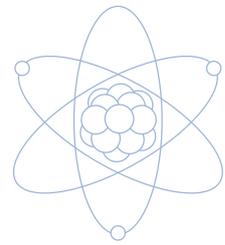
Le **choix d'un cycle ouvert ou fermé doit être** basé sur des considérations liées à des aspects économiques (provisions, taille du parc nucléaire, marché du produit de base: l'uranium), énergétiques (réserves énergétiques disponibles, utilisation optimale du potentiel énergétique), techniques (géologie d'un site de stockage, maîtrise de la technologie), légaux (relations ou accords multilatéraux...) et sociétaux (comme l'acceptation par le public). On observe une tendance, dans certains pays, à un report complet ou partiel de cette décision au profit d'un choix temporaire s'appuyant sur l'entreposage sûr de plus ou moins longue durée du combustible utilisé. C'est notamment le cas de la Belgique.

23. Uranium et plutonium.



**Cycle du combustible fermé** (recyclage du combustible)  
et  
**Cycle du combustible ouvert** (sans recyclage du combustible)





## L'AMONT DU CYCLE DU COMBUSTIBLE

L'**extraction du minerai d'uranium** débute le cycle. Identifié il y a deux siècles, l'uranium compte parmi les éléments les plus répandus sur terre. Autant que le plomb, plus que l'étain ou l'argent. L'écorce terrestre en contient en moyenne 3 à 4 grammes par tonne<sup>24</sup>. L'uranium est extrait dans des mines à ciel ouvert, en galeries souterraines ou par lixiviation<sup>25</sup>.

L'uranium est particulièrement attractif pour les pays occidentaux. La diversification est importante, les plus grandes réserves d'uranium connues sont principalement situées dans les pays suivants: Canada, Australie, Kazakhstan; viennent ensuite la Russie, la Namibie, le Niger et l'Ouzbékistan, etc. Après le premier choc pétrolier de 1973, l'uranium a immédiatement offert l'avantage d'un approvisionnement régulier et garanti. Le production mondiale annuelle de minerai oscille entre 40 et 45 000 tonnes.

Pour extraire l'uranium du minerai, les roches sont concassées, broyées et soumises à plusieurs opérations chimiques: purification, précipitation, lavage, filtrage, etc. Cette suite de réactions donne un concentré jaune vif – yellow cake – qui contient environ 75% d'uranium. Typiquement, mille tonnes de minerai donnent une tonne et demie de yellow cake.

Le yellow cake est constitué d'uranium naturel comprenant un mélange de deux isotopes: l'U-238 à hauteur de 99,3% et U-235 à hauteur de 0,7%. Comme seul l'uranium 235 est fissile, il faut transformer le concentré afin de pouvoir l'enrichir en isotope 235. On procède en premier lieu à la conversion en hexafluorure d'uranium ( $UF_6$ ) par réaction chimique (à base de fluor).

Ces **transformations chimiques** sont réalisées dans des installations spécialisées en chimie nucléaire. En Europe, il existe deux centres où sont réalisées ces opérations : Malvesie en France et Springfields au Royaume-Uni. L'hexafluorure d'uranium est un solide à température ambiante qui sublime à 56°C. Il est transporté à l'état solide en grands cylindres d'environ 12 tonnes d'U. La sublimation est le passage direct de l'état solide à l'état gazeux sans passer par un état liquide. C'est à l'état gazeux qu'est réalisé l'étape suivante: l'enrichissement.

L'**enrichissement** consiste donc à augmenter la proportion en U-235. Pour pouvoir l'utiliser dans les réacteurs PWR, il faut atteindre un niveau d'enrichissement compris entre 3 et 5% d'U-235.

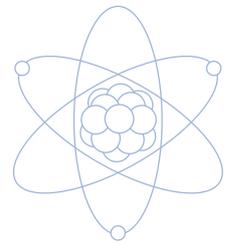
Différentes méthodes sont utilisées. Toutes sont basées sur la différence de masse entre les noyaux des deux isotopes (l'U<sup>238</sup> est légèrement plus lourd). La diffusion gazeuse fut le procédé le plus utilisé jusqu'à présent.

Yellow Cake



24. Le premier mètre d'épaisseur d'un jardin "classique" (y compris chez nous) de 10x10 m contient environ 400 grammes d'uranium.

25. La lixiviation consiste à lessiver la roche avec un solvant pour extraire le minerai.



## Le cycle du combustible

Il consiste à faire passer des molécules d' $UF_6$  à travers une série de fines parois poreuses (barrières de diffusion), les molécules d'hexafluorure d'U-235 plus légères traversent plus vite cette barrière. Mais le gaz obtenu de l'autre côté de celle-ci n'est enrichi que très faiblement. Pour obtenir de l'uranium enrichi à 3 ou 5 %, il faut plus de 1.000 cascades. L'usine d'Eurodif située à Pierrelatte (France) en compte 1 400.

Un autre procédé a été développé en particulier en Europe sur base de l'ultracentrifugation<sup>26</sup>, la France et l'Allemagne s'y rallient également. URENCO dispose d'unités de production basées sur cette technique aux Pays-Bas, Allemagne et Angleterre.

Vient ensuite la fabrication du combustible. Le gaz enrichi est transformé en poudre noire d'oxyde d'uranium qui est comprimée puis cuite à haute température pour former des pastilles de type céramique (de la dimension d'un dé à coudre) qui seront ensuite empilées dans des tubes cylindriques en zircaloy de quatre mètres de long, appelés crayons. Ces crayons sont ensuite assemblés pour constituer un élément combustible.

Pour un réacteur PWR de 1 000 MW, on regroupe 264 de ces crayons, longs d'environ 4 mètres, pour constituer un assemblage de combustible. Le coeur du réacteur contient 157 de ces assemblages, soit 41 448 crayons et plus de 11 millions de pastilles. Ce qui correspond à 72,5 tonnes de combustible.

Usine d'Eurodif



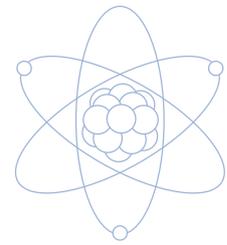
Crayons et éléments combustible



Urenco (Allemagne): installation d'enrichissement en U 235



26. Ce procédé utilise l'action de la force centrifuge sur l'hexafluorure gazeux contenu dans un récipient tournant à grande vitesse autour de son axe. L'isotope le plus lourd (U-238) se dirige vers la périphérie et par conséquent l'uranium s'enrichit en U-235 à proximité de l'axe du récipient. Une installation industrielle d'ultracentrifugation est équipée de milliers de centrifugeuses



## FISSION DANS LE RÉACTEUR

Le combustible va passer plusieurs années dans le réacteur où il va subir lors des réactions de fissions, d'importantes modifications qui portent sur sa teneur en matière fissile, sa composition et son état physique. Au cours de son séjour dans le coeur du réacteur, la quantité d'U-235 diminue progressivement suite aux réactions de fission, engendrant des produits de fissions, et une partie de l'U-238 se

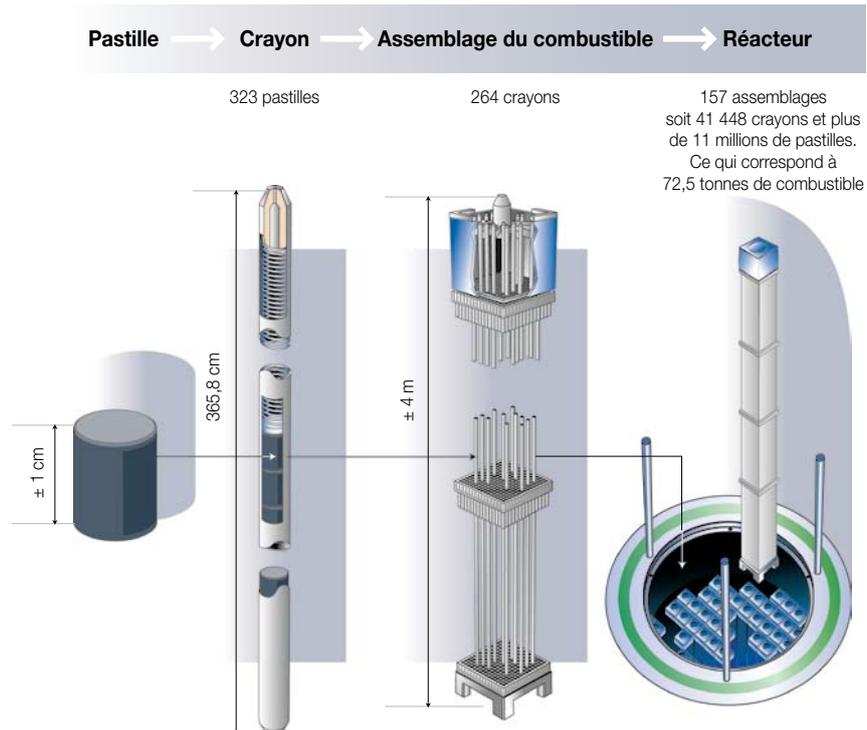
transforme en transuraniens (éléments dont le numéro atomique est supérieur à 92) par capture neutronique, c'est notamment le cas du plutonium.

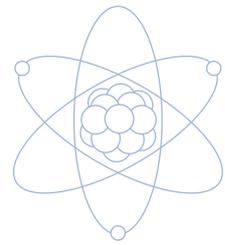
Après une période de fonctionnement du réacteur de 12 à 18 mois, un tiers de ces assemblages est remplacé par des assemblages neufs. Lorsque le combustible quitte le réacteur et pour 100% de combustible présents à l'origine (environ 4% d'U-235 et 96% d'U-238), il reste 1% d'U-235, 95% d'U-238, 1% de Pu-239 et 3% de produits de fission.

Binnenzicht van een PWR-reactor



## Réacteur PWR de 1000 MW





### L'AVAL DU CYCLE COMBUSTIBLE

Jusque dans les années '80, le prix de l'uranium était élevé et les réserves mondiales en combustibles fossiles paraissaient relativement faibles par rapport aux besoins futurs estimés. En outre, était en cours le développement de réacteurs surgénérateurs dont la particularité est de produire plus de matière fissile<sup>27</sup> qu'ils n'en consomment. C'est donc **dans ce contexte**<sup>28</sup> que le retraitement du combustible usé s'était affirmé progressivement comme la **référence** mondiale pour la gestion de l'aval du cycle du combustible.

A partir de la seconde moitié des années 70 et pour diverses raisons (notamment de non-prolifération), les Etats-Unis optent pour une politique de non-retraitement. Au même moment, on note encore aux Etats-Unis une chute des investissements dans de nouvelles centrales nucléaires suite à l'accident de Three Mile Island. Bien que d'une technologie totalement différente, l'accident du réacteur de Tchernobyl entraînera l'abandon de plusieurs projets de centrales nucléaires dans de nombreux pays occidentaux. La découverte d'importantes réserves d'uranium et de nouveaux procédés d'extraction entraînent l'effondrement de son prix, l'offre dépassant largement la demande. Le développement de la filière des surgénérateurs allait s'arrêter et la nécessité de disposer de plutonium allait fortement diminuer. Ce changement complet de contexte a généré, en Belgique, un débat parlementaire en 1993 sur la gestion du combustible nucléaire usé. De manière très synthétique, le Gouvernement, sur base des recommandations du Parlement, a décrété un moratoire sur la signature de nouveaux contrats de retraitement, a autorisé le recyclage de plutonium séparé dans les centrales nucléaires belges à concurrence de 4,8 tonnes et s'est prononcé en faveur d'un examen en profondeur des options de recyclage et non-recyclage (évacuation directe) placées sur un pied d'égalité.

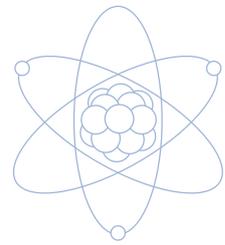
### Stockage temporaire des éléments combustibles

A la sortie du réacteur, le combustible usé dégage encore de l'énergie sous forme de chaleur résiduelle. Dans l'attente d'un éventuel recyclage ou d'une évacuation directe, le combustible est stocké temporairement sur le site de production même, soit dans une piscine (Tihange) soit dans des containers (Doel) dans lesquels sa radioactivité va décroître. Cette période d'entreposage temporaire permet la décroissance naturelle de certains noyaux lourds ainsi que des produits de fission à vie courte. De toute manière, la période de stockage temporaire est une étape nécessaire car elle permet au combustible de refroidir suffisamment avant d'être enfoui.



27. Dans ce cas le plutonium.

28. Préservation des ressources énergétiques, motivation économique (récupération et utilisation des matières énergétiques du combustible usé – en particulier le plutonium dans les surgénérateurs) et motivation écologique (réduction du volume des déchets).



### Cycle fermé: le recyclage

#### Le retraitement: première étape du recyclage du combustible nucléaire usé

Le combustible nucléaire ne libère qu'une partie de son énergie. A la sortie d'un réacteur, il contient encore environ 95% d'uranium (dont 1% d'U-235) et 1% de Pu-239, réutilisables pour produire à nouveau de l'électricité.

Le **retraitement, première étape du recyclage du combustible nucléaire usé**, consiste à séparer ces matières valorisables des "cendres" des réactions nucléaires (soit 3% de la masse du combustible usé) qui regroupent les produits de fission et les actinides mineurs<sup>29</sup>. L'uranium récupéré par le processus de retraitement est à nouveau enrichi. Quant au plutonium<sup>30</sup>, il est purifié, transformé en oxyde (poudre) et conditionné dans des boîtes étanches. Ensuite, il est mélangé à de l'uranium appauvri et devient ainsi du MOX<sup>31</sup>, abréviation de Mixed OXide, utilisé dans certains réacteurs dans le monde, et notamment en Belgique<sup>32</sup> de 1995 à 2006. En remplaçant un élément combustible standard d'uranium par un assemblage MOX on utilise

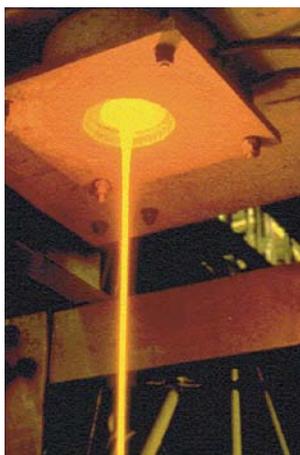
9 kg de plutonium au lieu d'en produire 5 kg. Le recyclage du plutonium en MOX diminue ainsi incontestablement la quantité de plutonium produite par les centrales et donc aussi le besoin en minerai d'uranium.

Pour le retraitement et dans le cadre belge, des contrats ont été conclus avec l'usine Areva NC La Hague en France.

#### Vitrification des produits de fission

Les produits de fission contenus dans le combustible usé représentent l'essentiel de la radioactivité liée à la production d'électricité. Ces produits de fission ne sont pas réutilisables et sont gérés comme des déchets de haute activité. Lors du retraitement, la petite fraction (3%) de produits de fission et d'actinides est "vitrifiée", c'est-à-dire incorporée à haute température dans un verre au borosilicate qui les immobilise et permet leur confinement sous une forme appropriée à leur enfouissement définitif. A l'échelle internationale, le verre au borosilicate est unanimement reconnu comme étant la matrice la mieux adaptée,

Coulée du verre



Conteneur de déchets vitrifiés

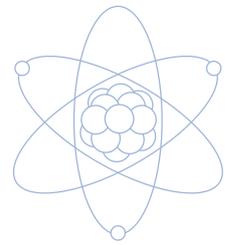


29. Certains neutrons, au lieu de désintégrer les atomes d'uranium, sont captés par ces derniers, donnant naissance à des atomes plus lourds que les atomes initialement présents, il s'agit des actinides; les actinides autres que l'uranium et le plutonium sont appelés actinides mineurs.

30. Élément produit dans un réacteur nucléaire dont certains isotopes ont la propriété, eux aussi, d'être fissiles. En particulier, le Pu-239 participe à environ un tiers de la production d'énergie provenant du combustible dit "standard".

31. Mixed OXide, mélange de plutonium – 7% - et d'uranium appauvri – 93% -, sous-produit du processus d'enrichissement.

32. En 1993, le gouvernement belge a accordé à Electrabel, l'exploitant belge des centrales nucléaires, les autorisations pour utiliser du combustible MOX pour la production d'électricité dans les centrales nucléaires de Doel et Tihange.



(les produits de fission ainsi vitrifiés ne peuvent se répandre dans l'environnement, ni sous forme gazeuse, ni liquide, ni même de particules) et la plus stable pour ces déchets. Ceci constitue le déchet vitrifié qui, dans un volume compact, contient 99% de la radioactivité totale des différents déchets séparés au cours des opérations de retraitement.

Le conteneur, dans lequel les déchets vitrifiés sont coulés, est un cylindre en acier inoxydable de 1,34 mètre de hauteur et 43 cm de diamètre, hermétiquement fermé et contenant 150 litres (environ 400 kg) de verre solide dont 14 % de produits de fission correspondant au résidu hautement radioactif d'environ 1,4 tonne de combustible usé.

### Entreposage intermédiaire des déchets vitrifiés

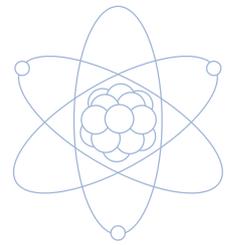
Dans un premier temps, les déchets vitrifiés en provenance du retraitement des combustibles belges à Areva NC La Hague sont stockés, de façon intermédiaire et sûre, sur le site de BELGOPROCESS, filiale de l'ONDRAF, à Des-sel en Campine dans un bâtiment d'entreposage construit

spécialement à cet effet. De façon intermédiaire parce que ce bâtiment de stockage n'est pas la destination finale des déchets hautement radioactifs, ces derniers doivent être isolés, en toute sûreté, dans un endroit où leur radioactivité pourra continuer à décroître de manière naturelle. Les déchets vitrifiés dégagent initialement une puissance thermique maximale de l'ordre de 2 kW par conteneur, soit une puissance comparable à celle d'un radiateur électrique à usage domestique, et doivent dès lors refroidir pendant une cinquantaine d'années dans un lieu d'entreposage approprié avant qu'ils puissent être enfouis dans des couches géologiques profondes et stables.

Le bâtiment d'entreposage a été étudié pour résister à des conditions extrêmes : séisme, tempête, explosion proche et impact d'un avion de chasse. C'est pourquoi l'aire d'entreposage est entourée de murs épais et résistants, dont l'armature assemblée par des mouffles lui permet de conserver son intégrité même en cas de forts séismes. Ces murs permettent aussi de maintenir le niveau de rayonnement à l'intérieur comme à l'extérieur du bâtiment d'entreposage bien en dessous des normes légales.

Bâtiment d'entreposage de déchets vitrifiés





### Cycle ouvert: l'évacuation

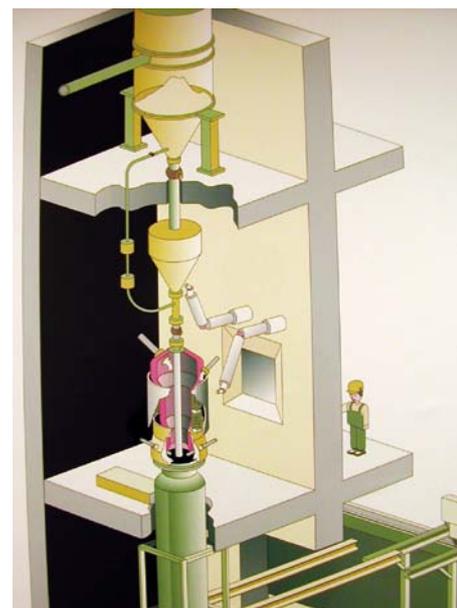
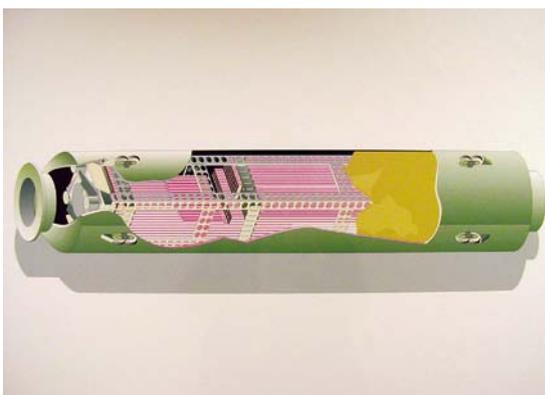
Avec l'évacuation directe du combustible usé, il n'y a pas de séparation sélective des matières utilisables et inutilisables comme dans le cas du recyclage. Le conditionnement a pour objectif d'assurer le confinement de l'élément combustible afin d'éviter la dispersion des radioéléments et de permettre la manipulation aisée du combustible usé au cours des étapes suivantes de sa gestion. Ce conditionnement devra donc être développé en tenant compte des critères résultants des travaux de recherche et développement sur l'évacuation géologique qu'effectue l'ONDRAF en ce moment.

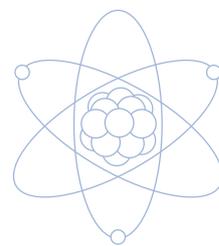
Un emballage cylindrique - appelé "bouteille" - a été conçu pour le conditionnement des éléments combustibles usés; excepté sa longueur, cet emballage ressemble à celui des conteneurs de déchets vitrifiés. Comme les conditions géologiques diffèrent d'un pays à l'autre

(sel, argile, granite, etc.), il n'existe pas de procédé standard pour le conditionnement des éléments de combustible et chaque concept doit être adapté en fonction du contexte géologique.

Entre 1995 et 1998, la conception d'une usine de conditionnement ainsi que l'élaboration d'un procédé de conditionnement ont fait l'objet d'études approfondies. Un dispositif d'essais a également été développé pour simuler les étapes critiques du procédé (le remplissage de sable et le soudage étanche de la bouteille, après introduction d'un élément combustible conditionné). (voir figure ci-dessous)

Fin 1998, le gouvernement a recommandé aux spécialistes de poursuivre les travaux entrepris sur le conditionnement du combustible usé ainsi que sur l'enfouissement géologique, tout en continuant l'examen comparatif du cycle ouvert (évacuation directe) et du cycle fermé (recyclage).





### Mise en dépôt définitif

Au niveau international, les scientifiques reconnaissent que l'enfouissement en couches géologiques profondes, stables et peu poreuses constituerait une bonne solution pour les déchets de haute activité (qu'ils soient vitrifiés – cycle fermé - ou qu'ils proviennent d'une évacuation directe – cycle ouvert - du combustible usé). Dans notre pays, différentes roches répondent à ces critères, parmi lesquelles l'argile de Boom. Un programme unique et intensif de recherche en laboratoire souterrain est en cours depuis plus de 30 ans (accumulant énormément de données confirmant ce choix) sur le site du Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire (CEN•SCK) à Mol, afin de démontrer la faisabilité technique et pratique de l'enfouissement dans ce type de roche hôte.





La sûreté nucléaire couvre l'ensemble des dispositions techniques et d'organisation prises à tous les stades de la conception, de la construction, du fonctionnement et de l'arrêt d'installations nucléaires pour en assurer un fonctionnement normal, prévenir les accidents et en éliminer les conséquences pour la santé et l'environnement.

Dans le domaine nucléaire, la sûreté a toujours été une préoccupation essentielle du monde scientifique et des industriels. Le nucléaire et l'aviation sont des exemples uniques de la technologie du monde occidental où la sûreté a joué un rôle prépondérant depuis le début de leur développement. Les progrès technologiques, la qualification et la formation du personnel, les mesures de gestion des accidents et une efficacité réglementaire renforcée ont permis de réduire les risques et les probabilités d'accidents nucléaires.

## PRINCIPES FONDAMENTAUX

En dehors des principes fondamentaux décrits ci-après, la sûreté nucléaire est également portée par les hommes, par leurs compétences et par une organisation efficace. Ces attitudes sont des piliers de la culture de sûreté, qui impose à l'ensemble des intervenants d'adopter un comportement interrogatif, rigoureux, prudent et communicatif.

### Défense en profondeur

Le concept de défense en profondeur consiste à prendre en compte de façon systématique les "faiblesses" potentielles (techniques et humaines) et à s'en prémunir par des dispositions successives :

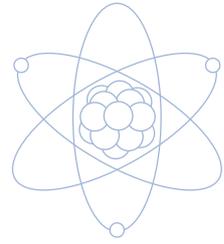
- prévention contre les déviations du fonctionnement normal et la défaillance des équipements.  
Cela implique que le réacteur soit conçu, construit, maintenu et exploité avec attention et selon des pratiques de qualité;
- détection et réaction à des déviations du fonctionnement normal afin de prévenir l'arrivée de situations accidentelles. Cela implique la mise en place de systèmes spécifiques et de procédures destinées à l'opérateur, minimisant les conséquences de ces événements initiateurs. Ces systèmes et procédures seront pris en compte dans l'analyse de sûreté (voir p. 64);

- prévision de systèmes de sûreté supplémentaires basés sur une évaluation des conséquences d'accidents hypothétiques. Dans le cas où les principes précédents ne suffiraient pas à réduire les conséquences d'un événement initiateur, des systèmes spécifiques et des procédures adaptées doivent permettre de conduire une installation nucléaire dans un état sûr et stable. En cas de risque de relâchement de radioactivité dans l'environnement, des mesures d'ordre organisationnel sont également prises et traduites dans un plan d'urgence (voir p. 68).

Les principes de défense en profondeur s'appliquent à toutes les activités ayant trait à la sûreté. Si un événement arrive, il doit être détecté et corrigé par des mesures appropriées. Si une barrière de protection venait à céder, il en reste d'autres pour s'opposer au relâchement de radionucléides dans l'environnement, chaque barrière étant indépendante.

### Plusieurs barrières

Plusieurs "barrières" sont destinées à enfermer les matières radioactives et empêcher leur relâchement dans l'environnement. La Belgique étant un pays à forte densité de population, une volonté constante des concepteurs des centrales (si l'on prend cet exemple d'installation nucléaire) a été de multiplier ces barrières. La première (a.) d'entre elles est constituée de la pastille de combustible elle-même, la seconde (b.) des gaines en alliage spécial



dans lesquelles sont empilées les pastilles de combustible. La troisième (c.) est composée de l'ensemble du circuit primaire (voir p. 35) dans lequel circule de l'eau qui transporte la chaleur émise par les assemblages-combustibles. Enfin, les deux dernières barrières (d.) sont composées des deux enceintes de confinement du bâtiment réacteur qui, répondant à une série de critères d'étanchéité, mais aussi de sismicité<sup>33</sup>, de résistance à une chute d'avion<sup>34</sup>, etc., qui permettent de faire face aussi bien à un accident d'origine interne qu'externe.

### Maîtrise des fonctions de sûreté

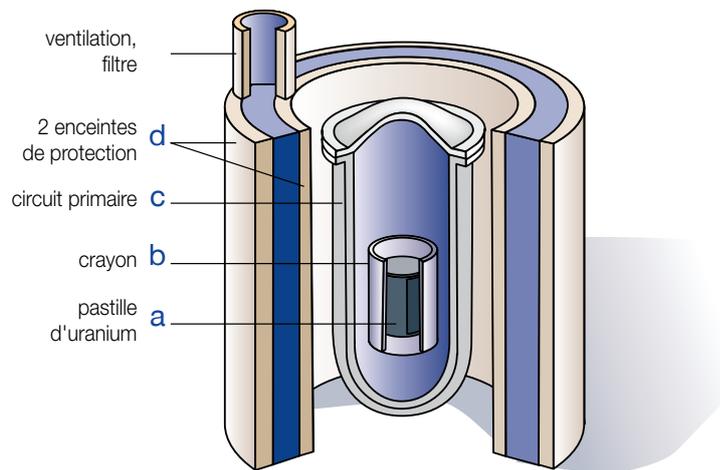
La maîtrise des fonctions de sûreté (contrôle de la réaction en chaîne, refroidissement du combustible et confinement

des matières radioactives) impose des règles essentielles comme la redondance des équipements, leur diversification et leur séparation physique.

Afin de démontrer que les objectifs de sûreté sont atteints, il faut montrer que les moyens mis en place permettent de les satisfaire en respectant des critères quantitatifs ou critères de sûreté qui correspondent à des limites physiques (température, pression, etc.) à ne pas dépasser, citons :

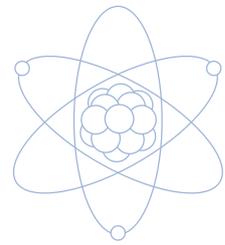
- le combustible, qui doit résister à l'irradiation et aux processus de détérioration (corrosion, vibration, fatigue, etc.) qui peuvent arriver en conditions d'exploitation normale, de transitoires d'exploitation et accidentelles;

## Les différentes barrières entre le combustible et l'environnement



33. Les centrales belges suivent la réglementation américaine, conformément à la décision des autorités de sûreté belges. Cette réglementation définit deux séismes de référence : le Safe Shutdown Earthquake (séisme maximum potentiel ou séisme ayant une période de retour de 10 000 ans, pour lequel la centrale doit pouvoir être arrêtée en sûreté, sans risque pour la population) et l'Operating Basis Earthquake (séisme raisonnablement attendu durant la vie de l'unité ou séisme ayant une période de retour de 500 ans, pour lequel la centrale peut continuer à être exploitée moyennant certaines vérifications réglementaires). Les bâtiments contenant les équipements liés à la sûreté sont conçus pour résister au 1er critère. Il en est de même pour les équipements requis pour mettre la centrale à l'arrêt en sûreté. En pratique, quand on fait une modification ou que l'on implante un nouvel équipement devant résister au séisme, on teste chaque composant sur table vibrante. Le montage sur site devra être identique à celui testé. Les tracés des tuyauteries sont calculés pour pouvoir subir des déplacements sans provoquer de fuite et sans toucher les équipements à proximité.

34. D'une manière générale, les centrales nucléaires belges sont sans doute les installations civiles les mieux protégées pour faire face à une agression terroriste similaire à celle du 11 septembre 2001. Une centrale nucléaire n'est pas une cible comparable à celle du WTC : un facteur 10 les distingue en terme de hauteur des bâtiments et la configuration du site ainsi que la taille du bâtiment du réacteur et les structures qui l'entourent rendent une approche précise pratiquement impossible. Suite aux attentats du 11 septembre, des études complémentaires ont montré que les structures des différents bâtiments (réacteur, piscines de stockage) résistent à des sollicitations plus importantes que celles considérées lors de la conception et que la sûreté des installations nucléaires serait maintenue (en particulier pas de risque de fusion du cœur). En sus, depuis cette date, plusieurs mesures ont été engagées, de manière durable et en accord avec les autorités compétentes : vigilance renforcée pour l'accès des personnes, formation spécifique du personnel concerné, nouveau matériel installé (principalement pour lutter efficacement contre un feu de kérosène de grande ampleur), etc.



- le cœur et la cuve du réacteur; outre leur résistance aux forces appliquées, tant en conditions nominales que pour les conditions des accidents de dimensionnement, leur conception doit permettre d'en vérifier la qualité par l'inspection en service et la testabilité des éléments, mais aussi les systèmes de protection et de contrôle associés;
- les systèmes de refroidissement du réacteur; des dispositions doivent être prises pour contrôler l'inventaire en fluide réfrigérant, sa température et sa pression de façon à s'assurer que les limites définies dans les conditions de fonctionnement normales et accidentelles ne peuvent être dépassées. Des moyens adéquats doivent être mis en place pour évacuer correctement la puissance résiduelle; ces moyens doivent inclure des possibilités d'interconnexion et d'isolement des circuits (nécessaires à la détection des brèches et de leur isolement) suffisamment fiables et avec les niveaux de redondance, de diversification et d'indépendance nécessaires;
- l'enceinte de confinement, qui doit permettre de maintenir d'éventuels rejets de matériaux radioactifs dans l'environnement en dessous des limites spécifiées, même pour des conditions accidentelles. La résistance mécanique du confinement doit être calculée à partir des chargements mécaniques et thermiques résultant des accidents de dimensionnement avec des marges suffisantes. Les effets d'autres sources potentielles de chargement (réactions chimiques, radiolyse, événements externes, etc.) doivent aussi être considérées.

## L'analyse de sûreté

L'analyse de sûreté a pour objectif de confirmer que les bases de conception des éléments importants pour la sûreté sont adéquates. Elle doit démontrer que l'installation est conçue de façon à ce que les limites prescrites pour garantir l'absence de conséquences inacceptables, notamment du point de vue radiologique, sont respectées, même en conditions accidentelles graves. La démonstration de sûreté peut suivre une approche déterministe ou probabiliste.

## L'approche déterministe

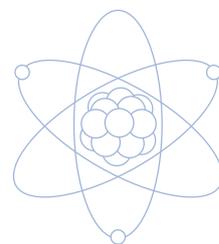
Les bases de conception des systèmes importants pour la sûreté ont été établies au départ en considérant des événements extrêmes pour lesquels on devrait encore pouvoir satisfaire les objectifs de sûreté. Cette démonstration est faite en définissant à priori une série de transitoires incidentels et accidentels de dimensionnement, c'est-à-dire enveloppant de façon pessimiste toutes les catégories d'événements pouvant être attendues. Ces transitoires sont définis selon les principes suivants :

- le transitoire résulte d'une défaillance unique réunissant les conditions les plus critiques envisageables;
- le transitoire est affecté par des conditions aggravantes, telles que par exemple la défaillance d'un système de protection;
- le transitoire intervient dans des conditions de fonctionnement les plus critiques et l'efficacité des systèmes de protection est minimisée.

## L'approche probabiliste

Les études probabilistes de sûreté envisagent de la manière la plus exhaustive possible les séquences incidentelles et accidentelles qui peuvent affecter l'installation. On considère comme séquences accidentelles des séries de défaillances dont on peut chiffrer la probabilité d'occurrence et dont on peut évaluer les conséquences, par exemple du point de vue radiologique. On peut ainsi chiffrer pour chaque séquence accidentelle tant l'ampleur que la probabilité des conséquences. Contrairement à l'analyse déterministe, qui se veut enveloppe, l'approche probabiliste ne considère pas seulement des situations extrêmes peu probables, mais l'ensemble des situations auxquelles on peut attribuer une certaine probabilité et dont on fait l'analyse en retenant tant des paramètres que des méthodes de calcul aussi réalistes que possible, en tenant compte des incertitudes.

Cette approche permet une analyse systématique des conditions d'exploitation de l'installation en identifiant :



- les événements initiateurs apportant la plus forte contribution au risque global, y compris les événements d'origine externe;
- les faiblesses des systèmes de protection accroissant les conséquences d'accident;
- les améliorations de conception et des procédures normales et d'urgence, permettant de réduire les probabilités et conséquences d'accidents sévères.

### Pratiquement

Les différentes étapes de l'analyse sont les suivantes :

- identification des événements initiateurs qui pourraient conduire à un relâchement de matériau radioactif à l'intérieur ou à l'extérieur de l'installation;
- regroupement des autres événements initiateurs par groupe de façon à ne définir qu'un nombre limité d'accidents à partir desquels les systèmes et composants seront conçus;
- identification des accidents pouvant avoir des conséquences radiologiques;
- exclusion par conception des situations pouvant conduire à un relâchement prématuré de matière radioactive. On entend que ces situations doivent être identifiées et que les mesures de conception doivent être prises afin de rendre extrêmement peu probable l'occurrence de tels scénarios. Pour les réacteurs PWR, il s'agit :
  - des accidents de réactivité (provoquant une augmentation de puissance de réacteur) liés à l'injection d'eau froide ou d'eau claire non borée;
  - des situations de fusion du cœur;
  - les situations conduisant à la détonation hydrogène.

## RÉGLEMENTATION ET ACTEURS

En Belgique, les installations nucléaires sont régies par la loi du 15 avril 1994 et l'arrêté royal de mise en application 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 (RGPRI).

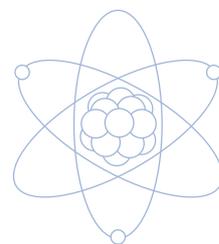
### Au niveau de l'exploitant

C'est l'exploitant qui est responsable de la sûreté de son installation car lui seul est à même de poser les gestes concrets qui influencent directement la sûreté. La sûreté est dès lors une priorité absolue pour les exploitants; en effet, une exploitation sûre garantit non seulement la protection du personnel, de la population et de l'environnement mais aussi le bon fonctionnement des installations à long terme.

Un service interne (propre à l'exploitant) de prévention et de contrôle (appelé Service de Contrôle Physique) est réglementairement chargé de l'organisation et de la surveillance des mesures nécessaires pour assurer le respect du règlement général de la protection de la population, des travailleurs et de l'environnement contre le danger des rayonnements ionisants.

### L'Agence Fédérale de Contrôle Nucléaire et les organismes agréés

Le contrôle des installations nucléaires belges est de la responsabilité de l'Agence Fédérale de Contrôle Nucléaire (AFCN, organisme d'intérêt public, [www.fanc.fgov.be](http://www.fanc.fgov.be)), placée sous la tutelle du Ministre de l'Intérieur, dont l'objectif est de veiller à ce que la population et l'environnement soient protégés d'une manière efficace contre le danger des rayonnements ionisants. Son statut lui octroie une large indépendance, indispensable à l'exercice impartial de sa responsabilité envers la population.



Pour le contrôle permanent sur les sites, l'AFCN fait appel à un organisme spécialisé et agréé par les autorités belges qui est chargé d'assurer la réception des installations et d'en vérifier le bon fonctionnement; cette vérification est permanente pour les installations de classe I (centrales nucléaires par exemple), au moins trimestrielle pour les installations de classe II, et ou au moins annuelle pour les installations de classe III.

Les principaux organismes de contrôle des activités nucléaires sont Bel-V, AIB-Vinçotte Controlatom (AVC) et Techni-Test. Ces organisations couvrent des domaines différents mais complémentaires du secteur nucléaire :

- Bel V<sup>35</sup> assure le contrôle de la sûreté des quatre unités de Doel et des trois unités de Tihange. Elle intervient à tous les stades de la vie des centrales : conception, construction, exploitation et démantèlement. Les agents de Bel-V, chargés du contrôle en exploitation ont un accès libre et permanent sur le site des centrales. Bel-V assure, aussi, le contrôle de BELGOPROCESS à Dessel, du centre de recherche CEN•SCK à Mol, de BELGONUCLEAIRE à Dessel et de l'IRE à Fleurus. Vu son expertise, Bel-V collabore à de multiples projets internationaux et représente la Belgique lors de réunions techniques tenues, entre autres, par l'AIEA (Agence Internationale de l'Energie Atomique) ou l'AEN (Agence Européenne pour l'énergie Nucléaire);
- AV Controlatom contrôle plus de 3 000 établissements, dont FBFC (Franco-Belge de Fabrication de Combustible) à Dessel et l'IRMM (Institut des Matériaux et des Mesures de Référence) à Geel, allant des transporteurs de matières radioactives aux laboratoires universitaires en passant par les appareils de radiographie pour les applications industrielles, hospitalières, etc. Elle effectue également la plus grande partie de la dosimétrie individuelle des quelques 20 000 travailleurs professionnellement exposés aux

radiations ionisantes; ces travailleurs se répartissent environ comme suit: 74 % dans le secteur médical, 20 % liés au cycle du combustible nucléaire (sont inclus ceux des centrales nucléaires), 2 % de l'industrie et 4 % autres;

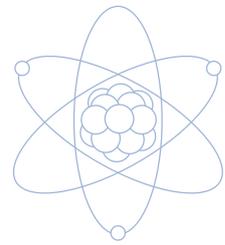
- Techni-Test contrôle la plupart des exploitants de classe III.

### Au niveau international

L'organisation de la sûreté en Belgique est d'un niveau équivalent aux recommandations émises par les organismes internationaux comme l'AIEA, l'AEN, WENRA ou encore WANO :

- Créée en 1957 par l'Organisation des Nations Unies, l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) avait pour objectifs premiers de promouvoir l'utilisation de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques et de veiller à ce qu'elle ne soit pas détournée à des fins militaires. Dès le début des années 70, l'AIEA s'est attachée à développer des normes de sûreté destinées à la conception et à l'exploitation de centrales nucléaires. S'est ensuite rapidement mis en place, encouragé entre autres par l'Agence pour l'Energie Nucléaire (AEN), un système de collecte, d'analyse et de diffusions d'informations relatives à la sûreté au profit des pays nucléaires du monde qui souhaitaient y participer. Face à la construction d'un nombre croissant d'installations et sous l'impulsion des exploitants, l'AIEA a élargi ses activités en proposant des services plus proches des installations. L'organisation a créé des équipes internationales ne se contentant plus d'examiner des documents mais allant, à l'invitation des pays, voir directement sur les sites comment la sûreté était effectivement assurée en exploitation. C'est ainsi que le service OSART (Operational Safety Review Team) est né en 1982.

35. Le 11 avril 2008, AVN (Association Vinçotte Nucléaire) et Bel-V (anciennement appelée AVN) ont conclu un accord sur le transfert des activités de contrôle d'AVN vers Bel-V. Cette filiale de l'Agence fédérale de Contrôle nucléaire a été créée le 7 septembre 2007. La filialisation s'inscrit dans le cadre des recommandations de la résolution parlementaire de 2007 qui visaient à organiser plus efficacement les contrôles réglementaires nucléaires en Belgique afin de garantir la sûreté des travailleurs et de la population. Grâce à ce transfert, tous les contrôles réglementaires qu'effectuait AVN ont été repris en main par Bel-V. Les démarches se poursuivront pour permettre la conclusion d'accords similaires avec d'autres organismes actifs dans le domaine de la sûreté nucléaire et de la radioprotection.

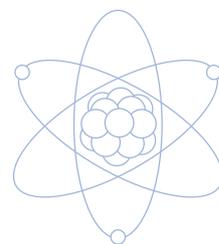


- Le programme OSART a pour objectif d'aider les exploitants des États membres à renforcer la sûreté opérationnelle de leurs centrales nucléaires et de promouvoir le développement continu de cette sûreté par l'échange d'informations concernant les bonnes pratiques, nouvelles méthodes et façons de faire; en un mot, l'excellence dans le domaine de la sûreté nucléaire;
- l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire s'attache à mettre en commun les connaissances en matière de sûreté et d'analyse des incidents qui ont lieu dans les installations nucléaires;
- l'organisation non gouvernementale WENRA (Western European Nuclear Regulators' Association), existant officiellement depuis 1999 et regroupant les autorités de sûreté nucléaire de 17 États (dont la Belgique), contribue pour sa part à la construction d'une culture

Une mission OSART, organisée par l'AIEA à la demande des autorités de sûreté nucléaire belges, s'est déroulée du 5 au 23 mai 2007 à Tihange. Le 23 mai 2007, l'équipe de quinze experts nucléaires internationaux a clôturé son audit de sûreté. Le bilan est positif et encourageant. Les experts ont entre autres confirmé la priorité accordée par Electrabel à la sûreté et la dynamique d'amélioration continue mise en place. Ils ont identifié des axes concrets d'amélioration qui permettront à Electrabel d'évoluer vers les meilleures pratiques au monde (référentiel OSART). Ils ont enfin relevé un nombre important de bonnes pratiques susceptibles de servir d'exemple pour les autres centrales nucléaires dans le monde.

européenne commune en matière de sûreté nucléaire. WENRA poursuit un triple objectif visant un processus continu d'amélioration et d'harmonisation des approches de sûreté en vigueur :

- entretenir et élargir un réseau international d'échange d'expérience des responsables de sûreté nucléaire;
  - développer une approche commune de la sûreté et de la réglementation nucléaires, en particulier dans l'Union européenne;
  - élaborer une capacité indépendante d'examen de la sûreté nucléaire;
- l'association WANO (World Association of Nuclear Operators) regroupe les exploitants nucléaires dans le monde. Elle vise à maximiser la sûreté et la fiabilité de fonctionnement des centrales nucléaires en échangeant des informations et en encourageant la communication, la comparaison et l'émulation entre ses membres. Elle organise, à la demande de ses membres, des "Peer Reviews WANO". Ces peer reviews reposent globalement sur les mêmes principes que les missions OSART. Les sites de Doel et Tihange font l'objet, de manière périodique, de ce type d'audits WANO.



## SÛRETÉ DANS LES CENTRALES BELGES

Les autorités belges ont été les premières à imposer à l'exploitant une obligation qui est aujourd'hui d'application dans de nombreux pays et qui fait partie des recommandations internationales actuelles: la révision périodique de sûreté (ou révision décennale). Cette disposition, inscrite dans les arrêtés d'autorisation des centrales, indique ainsi qu'après la mise en service industrielle de l'unité, l'exploitant et l'organisme agréé procèdent, tous les dix ans, à une comparaison entre d'une part l'état de la centrale et les règles qui y sont appliquées, et d'autre part les règlements, normes et pratiques les plus avancées à l'étranger. Ces révisions périodiques de sûreté permettent dès lors, en plus des améliorations apportées en permanence à l'installation, de faire évoluer significativement le niveau de la sûreté. La rénovation des systèmes de contrôle-commande, d'instrumentation et de sûreté ou encore des protections incendie sont des exemples de telles améliorations.

Les centrales nucléaires belges fonctionnent depuis plus de 30 ans déjà sans incidents ou accidents ayant entraîné un danger quelconque (spécifique à l'activité nucléaire) pour les travailleurs, la population et l'environnement.

### La sûreté dans les nouveaux Etats membres de l'Union européenne

Depuis le début des années nonante, un programme important a été mis sur pied, avec une aide internationale, en vue de moderniser tous les types de réacteurs nucléaires russes. Les réacteurs VVER ont facilement pu être améliorés et ont désormais un niveau de sûreté et de fiabilité tout à fait équivalent aux réacteurs d'Europe de l'Ouest.

Les moyens financiers proviennent en grande partie de la Commission européenne et de la Banque européenne pour la Reconstruction et le Développement. Malgré ces programmes de modernisation et suite aux négociations d'accession avec l'Union européenne, les réacteurs RBMK et VVER de première génération seront progressivement mis hors service, c'est notamment le cas de la Lituanie (fermeture de ses deux seuls réacteurs du type RBMK à Ignalina) et de la Slovaquie (fermeture des deux plus anciens réacteurs de la centrale nucléaire de Bohunice).

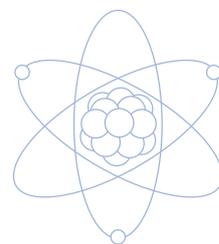
## PLAN D'URGENCE

Nous l'avons dit, un travail important est réalisé pour éviter tout accident pouvant affecter les installations et le personnel ainsi que l'environnement et le public. Cette démarche débute lors de la conception des installations et se poursuit tout au long de la vie de l'installation. Un des aspects traités est la mise en place par chaque exploitant d'une organisation d'urgence, sous le contrôle des autorités.

Chaque exploitant est donc tenu de mettre en place un Plan d'urgence interne pour faire face à tout ce qui pourrait se produire dans son installation et les autorités organisent un Plan d'urgence externe destiné à faire face aux conséquences d'un accident hors du site nucléaire incriminé.

### Cadre légal

En Belgique, la fixation du plan d'urgence nucléaire et radiologique pour le territoire belge est régie par les A.R. du 17 octobre 2003 et du 15 mars 2006. L'objectif du plan d'urgence est d'assurer la coordination des mesures de protection de la population et de l'environnement à prendre en cas d'urgence radiologique.



Outre l'organisation générale, le plan d'urgence décrit les missions à accomplir par les différents organismes et services, dans le cadre de leurs compétences légales et réglementaires respectives. Il est complété par des plans spécifiques d'intervention aux différents niveaux d'intervention (dont les autorités provinciales et communales) et par des procédures opérationnelles propres à chaque cellule appelée à jouer un rôle dans le cadre de ce plan. Le Ministre de l'Intérieur assure la coordination du plan d'urgence au niveau fédéral, l'Agence Fédérale de Contrôle Nucléaire (AFCN) assure une mission d'assistance technique et scientifique à l'élaboration des plans, l'Agence Fédérale pour la Sécurité de la Chaîne Alimentaire (AFSCA) participe également à l'organisation ainsi que l'Institut Royal Météorologique (IRM), le Centre d'Etude Nucléaire de Mol (CEN•SCK), l'Institut National des Radioéléments (IRE), les organismes comme Bel-V et de nombreux autres acteurs.

Ce plan d'urgence prend en compte l'expérience acquise au cours des dernières années (Tchernobyl, Tokai-Mura, crise de la dioxine en Belgique, Euro 2000, Présidence belge de l'UE en 2001, etc.). Les leçons tirées de tous ces incidents ou événements ont servi de base à des adaptations organisationnelles par rapport au précédent plan. Le plan d'urgence prévoit l'établissement d'un plan global annuel basé sur des exercices et débouchant sur un plan d'action.

Le plan d'urgence fédéral vise principalement les installations nucléaires importantes du pays mais également les accidents d'autre nature comme les conséquences d'accident de transport des matières radioactives, les accidents se produisant en milieu hospitalier ou ceux qui pourraient se produire à l'étranger et avoir des conséquences sur le territoire belge. Dans ce cadre, la Belgique a signé deux conventions avec l'AIEA datées du 26/09/86, portant l'une sur la notification prompte d'un incident nucléaire, l'autre sur l'assistance en cas d'accident nucléaire.

## Situations nécessitant une intervention d'urgence

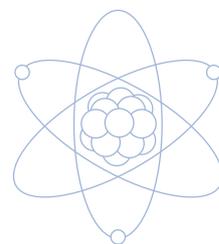
Dans des conditions normales d'exploitation d'une installation nucléaire, les doses additionnelles à la population locale sont maintenues à un niveau extrêmement bas, de plusieurs ordres de grandeur en-dessous du niveau de la radioactivité naturelle (cfr p. 17).

Toutefois, en cas d'accident grave, des substances radioactives pourraient être relâchées dans l'environnement et il convient de prendre des mesures de protection afin de réduire les doses au public. Parmi ces mesures exceptionnelles, on peut citer :

- le confinement dans les habitations ou la mise à l'abri;
- l'administration de comprimés d'iode stable;
- l'évacuation préventive, ou curative;
- le relogement temporaire ou permanent de la population;
- l'interdiction de consommer certains aliments;
- la modification de procédés agricoles et industriels;
- la décontamination.

Ces mesures de protection (sanitaire, économique, etc.), ne sont pas elles-mêmes sans conséquences : certaines ont un impact direct sur la santé et le bien-être. Quand il s'agit de choisir le niveau au-dessus duquel une mesure de protection donnée doit être prise, on doit trouver un équilibre entre les avantages qu'offre cette mesure en termes de réduction du risque radiologique pour la santé et les inconvénients résultant de la mesure elle-même.

Il faut absolument éviter de confondre les limites et les contraintes de dose relatives aux opérations normales et les niveaux d'intervention applicables après un accident. Dans le cas du contrôle de rejets planifiés, l'irradiation que procure la source elle-même dans l'installation est comparée à la radioexposition additionnelle qu'elle entraîne dans l'environnement. Dans le cas des interventions, l'avantage retiré de l'intervention est comparé à la réduction de la radioexposition due à l'action protectrice.



## Motifs de santé justifiant une action protectrice à la suite d'un accident

Des substances radioactives peuvent être accidentellement rejetées dans l'air, dans l'eau et sur terre. C'est dans le cas d'accidents entraînant des rejets importants dans l'atmosphère qu'il y a tout lieu de devoir prendre sans plus attendre des actions protectrices. Après tout rejet de substances radioactives dans l'atmosphère, la population peut être exposée aux rayonnements directement à partir du nuage radioactif ou par inhalation de particules et de gaz radioactifs provenant du nuage. A mesure que celui-ci se disperse, les substances se déposent à la surface du sol par temps sec ou sont lessivées par la pluie ou d'autres formes de précipitations. Par la suite, la population peut être exposée aux rayonnements directement

à partir de ces dépôts radioactifs, en inhalant des particules remises en suspension à partir du sol, en consommant des aliments contaminés ou en buvant de l'eau contaminée. Les dispositions du plan d'urgence s'appliquent donc au cas où la population risque d'être exposée à des doses radiologiques importantes via différentes voies d'exposition dues à :

- l'irradiation externe par la contamination de l'air et/ou des substances radioactives déposées;
- l'irradiation interne par l'inhalation d'air contaminé et/ou l'ingestion d'aliments ou d'eau contaminés.

## Principes régissant l'intervention

### Personnes du public

Les décisions relatives au déclenchement de mesures de protection restreignent la liberté de mouvement ou de choix de la population et sont onéreuses pour la société. Les trois principes généraux auxquels on se réfère pour décider une intervention sont les suivants :

- a. Tout devrait être mis en œuvre pour éviter de graves effets déterministes (voir p. 16) sur la santé. On peut éviter des effets déterministes graves si les doses à

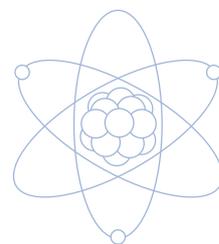
toutes les personnes du public sont maintenues au-dessous des valeurs seuils fixées pour ces effets.

- b. L'intervention devrait être justifiée, c'est-à-dire que les avantages découlant du déclenchement de la mesure de protection devraient l'emporter sur les inconvénients. L'intervention est justifiée quand il y a un avantage net à agir. Il est important de peser soigneusement les avantages et les inconvénients de l'intervention, car pour certaines mesures de protection, ces derniers peuvent l'emporter sur les avantages obtenus en évitant l'exposition.
- c. Les niveaux auxquels une intervention est entreprise et les niveaux auxquels cette mesure est levée ensuite devraient être optimisés, de manière que la mesure de protection procure un avantage net optimal. L'intervention est optimisée quand l'avantage net découlant d'une mesure de protection est maximum. Pour chaque action protectrice, on peut choisir un niveau d'intervention, au-dessus duquel l'action est normalement prise et au-dessous duquel elle ne l'est pas. La valeur du niveau d'intervention pour chaque action protectrice devrait être donc choisie de manière à obtenir l'avantage net maximum.

Les niveaux d'action pour l'intervention doivent être appliqués avec souplesse, de manière à éviter que des individus soient exposés à des risques élevés. Les autorités compétentes doivent garder à l'esprit que pour éviter une faible irradiation additionnelle, les inconvénients peuvent augmenter rapidement. Il est bon de rappeler que l'on compare des inconvénients immédiats et certains à des risques potentiels ultérieurs, ce qui implique des choix politiques.

### Travailleurs

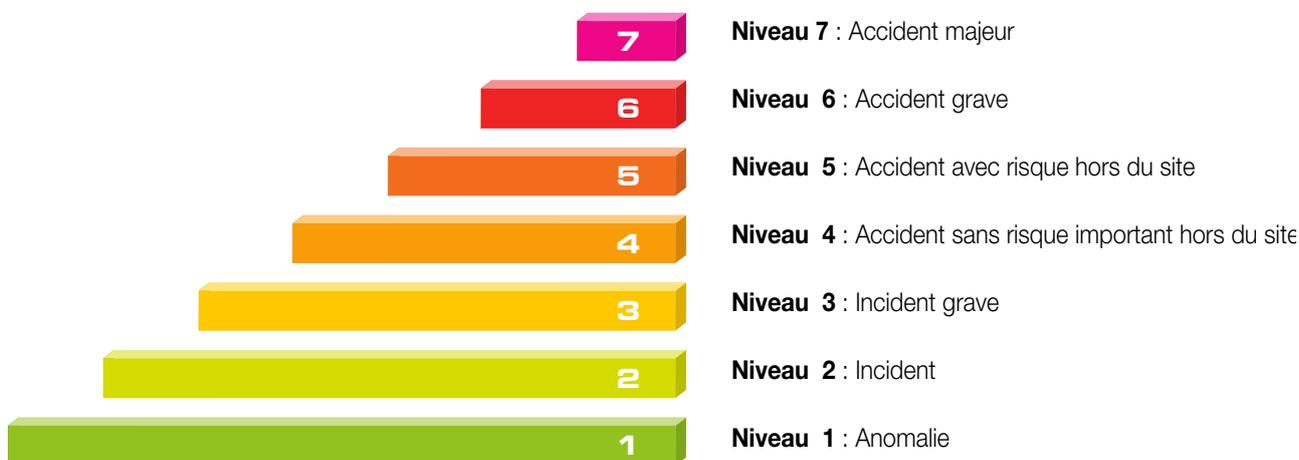
Pour un travailleur, ce qui devrait être justifié est l'exposition à la source et ce qui devrait être optimisé est la protection contre les rayonnements émis par cette source. En raison de cette exposition délibérée et contrôlée, les limites de dose pour l'exposition des

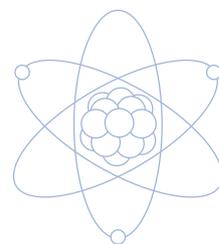


travailleurs doivent être maintenues tant qu'il n'y a pas lieu d'y déroger pour des raisons impérieuses. A propos de la justification de l'exposition, certaines raisons pourraient justifier la répartition inégale du détriment résultant de l'exposition de certains travailleurs à un niveau supérieur à celui qui a été explicitement fixé comme limite. Cette exposition se justifie par la nécessité d'entreprendre des actions destinées à sauver des vies immédiatement après un accident ou d'empêcher que celui-ci ne tourne à la catastrophe. Cette situation ne diffère pas de celles que vivent régulièrement les sapeurs pompiers ou la protection civile lors de gros incendies (ou d'explosions) dans des installations industrielles ou commerciales.

## L'ÉCHELLE INES

Les accidents de Three Mile Island et Tchernobyl ont mis en évidence les difficultés éprouvées par les responsables du secteur nucléaire à communiquer avec la presse et le grand public. Les spécialistes du nucléaire ont ainsi perçu la nécessité d'élaborer un moyen d'information de référence efficace qui puisse être utilisé en cas d'incident ou d'accident nucléaire. Ainsi est née l'échelle INES. L'échelle internationale des événements nucléaires INES (International Nuclear Event Scale) a été mise au point à la fin des années 80 par un groupe d'experts de l'AIEA et de l'AEN. Cette échelle est basée sur le même





principe que l'échelle de Richter utilisée pour évaluer la gravité des tremblements de terre. Elle comprend sept niveaux répartis en deux catégories. Les niveaux inférieurs (1 à 3) concernent des incidents, les niveaux supérieurs (4 à 7) des accidents. L'évaluation des incidents et accidents prend en compte trois critères: les conséquences pour la population et l'environnement (en dehors du site), les conséquences sur le site et la dégradation de la défense en profondeur ( voir p. 62). Seuls les événements ayant un impact, même potentiel, sur la sûreté nucléaire des installations sont repris dans cette échelle. A titre d'exemple, Three Mile Island a été classé au niveau 5 et Tchernobyl au niveau 7 de l'échelle INES.

Il est fondamental de rappeler qu'il s'agit exclusivement d'un outil de communication et que le nombre d'événements INES ne peut être utilisé seul pour évaluer le niveau de sûreté d'une installation nucléaire.

## TRAITÉ DE NON-PROLIFÉRATION

Les dirigeants politiques et le public craignent que des matières nucléaires sensibles, en particulier le plutonium, l'uranium hautement enrichi, le thorium 232 ou l'uranium 233, de même que la technologie et l'équipement mis au point et utilisés dans le cadre d'activités civiles ne soient détournés et employés à des fins militaires ou terroristes. Il convient de signaler que la plupart des pays qui choisissent d'acquérir des armes nucléaires le font par le biais de structures militaires spécialisées, souvent clandestines, et non en détournant des matières provenant de programmes nucléaires civils qui sont pour la plupart soumis au régime des garanties internationales. Il n'en demeure pas moins que le détournement des matières fissiles est un moyen possible de franchir une étape technique déterminante pour la construction des armes. De ce fait, il faut que le régime de non-prolifération soit étendu de façon à rendre extrêmement probable la détection des trafics de matière fissile, et par conséquent qu'il ait un effet dissuasif. Ceci est d'autant plus important que des programmes électronucléaires sont entrepris

dans de nouvelles régions et de nouveaux pays.

Le traité de non-prolifération des armes nucléaires de 1970 est le principal instrument mis en place pour décourager la production ou le détournement de matières à usage militaire. Ce traité engage 187 pays (tous les pays du monde; seuls Israël, l'Inde et la Pakistan n'ont pas signé le TNP) et incite explicitement les États non dotés d'armes nucléaires à recevoir les bénéfices de la technologie nucléaire pacifique en échange de leur consentement à renoncer aux armes nucléaires. Le respect des engagements ainsi contractés est contrôlé par un régime international de garanties, régi par l'AIEA, qui vérifie que les activités nucléaires des États qui ne disposent pas d'armes nucléaires sont exclusivement utilisées à des fins pacifiques. L'histoire montre que certains pays ont essayé de contourner leurs engagements, c'est le cas de l'Irak, de l'Iran ou de la Corée du Nord.

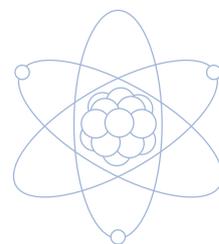
## LES ACCIDENTS

### Les principaux

Malgré la préoccupation permanente du niveau de sûreté dans les installations nucléaires, des accidents ont eu lieu. Assez paradoxalement, ces accidents ont constitué des opportunités d'accroissement très significatif du niveau de sûreté mondial. Dans un souci d'objectivité, nous avons synthétisé quelques événements représentatifs.

#### Goiana (perte de source médicale)

En 1987, une source radioactive scellée contenant une poudre de CsCl (60 Terra becquerels) a été enlevée d'un dispositif de radiothérapie à Goiana (Brésil). Cette source a été ouverte dans une zone résidentielle et la matière radioactive a été répandue dans une zone urbaine, sur 1 km<sup>2</sup> environ. Elle a causé la contamination et l'irradiation de nombreuses personnes. Au total, 110 000 personnes ont été contrôlées, parmi lesquelles 149 ont nécessité des soins médicaux. Quatre personnes sont mortes endéans le mois. Au total, 85 habitations étaient significativement



contaminées et 41 ont été abandonnées, 7 maisons ont été détruites, 45 lieux publics (rues, places, magasins, etc.) ont été décontaminés, ainsi que 50 véhicules. 3 000 m<sup>3</sup> de déchets radioactifs ont été générés et la situation fut totalement sans contrôle après 10 ans. Les eaux de pluie ont entraîné une vaste contamination de la rivière voisine sur plus de 10 km à des niveaux encore mesurables aujourd'hui.

### **Tokai-Mura (criticité)**

Le 30 septembre 1999 à Tokai Mura au Japon, un accident de criticité a eu lieu dans une usine de conversion d'uranium. Lors d'une fabrication particulière de combustible enrichi à 19 % (nettement supérieur à celui utilisé de manière courante dans les centrales nucléaires), destiné à un réacteur de recherche, quatre travailleurs inexpérimentés ont violé des procédures de sûreté. Afin d'obtenir un dépôt chimique désiré, les opérateurs réalisaient des manipulations avec de l'uranium. Omettant un contrôle intermédiaire obligatoire, la masse d'uranium (16 kg) a dépassé les valeurs admises (2,4 kg!) pour atteindre la "masse critique" qui enclencha une réaction de fission. Il n'y a pas eu d'explosion mais bien un rayonnement neutronique de forte intensité. Un accident de criticité s'est produit. Il s'en est suivi une formation de produits de fission nocifs sous forme gazeuse qui se sont, en partie, répandus en dehors de l'installation via le système de ventilation.

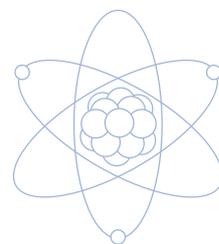
Trois travailleurs ont été exposés à une irradiation importante, un est décédé et une soixantaine de membres du personnel, de pompiers et de citoyens ont reçu une légère irradiation qui n'a pas engendré de conséquences physiques immédiates. Parmi les résidents du voisinage immédiat, 200 furent évacués car ils vivaient à moins de 350 mètres de l'endroit de l'accident. Aucun n'a reçu une irradiation supérieure à 25 mSv. En dehors des installations concernées, il n'y a pas eu d'effets sur la santé. Il est clair que le manque d'expérience des opérateurs et le non-respect des prescriptions de sûreté ont joué un rôle prépondérant.

### **Three Mile Island (fusion partielle de coeur)**

Le 28 mars 1979, un accident survient à l'unité n° 2 de la centrale américaine de Three Mile Island (TMI), située non loin d'Harrisburg en Pennsylvanie. A 4 heures du matin, une panne se produit dans le circuit secondaire - l'évacuation de la chaleur est interrompue. La soupape de décharge du circuit primaire s'ouvre suite à l'augmentation de pression dans le circuit primaire mais ne se referme pas. Suite à une mauvaise interprétation, l'opérateur arrête l'injection de sécurité et puis les pompes primaires. La température du cœur se met à augmenter rapidement. Une partie du combustible fond. Il faudra plusieurs heures avant que la situation ne soit maîtrisée. Durant ce laps de temps, une bulle d'hydrogène s'est formée suite à l'oxydation d'une partie du zirconium contenu dans les gaines. On sait aujourd'hui qu'il n'y avait pas de risque d'explosion de cette bulle mais à l'époque, ce scénario n'ayant jamais été imaginé, le personnel se retrouva face à une situation inattendue.

Devant le risque potentiel, la panique s'empara des responsables politiques et de la population, cette dernière étant invitée à quitter la région. En outre, il y eut également quelques faibles rejets radioactifs dans l'atmosphère. Mais des milliers de prélèvements d'échantillons d'air, de lait, d'eau et d'autres produits agricoles furent analysés et ne démontrèrent aucune contamination dangereuse pour la santé.

Les exploitants de PWR tinrent compte de l'expérience de TMI dans leur politique de sûreté et décidèrent d'intensifier leur collaboration concernant leurs expériences d'exploitation. Des formations supplémentaires furent notamment élaborées sur simulateur afin de reproduire différents scénarios d'incidents. En définitive, l'accident de TMI n'a porté conséquence, ni à la population ni à l'environnement.



### Tchernobyl (fusion de cœur, incendie et explosion)

Le 26 avril 1986 à 1h 23 du matin, une explosion s'est produite dans le réacteur n° 4 de la centrale nucléaire de Tchernobyl en ex-URSS. De conception exclusivement soviétique, le RBMK est un réacteur à uranium faiblement enrichi, eau bouillante et graphite, dont le design est optimisé pour la production de matières fissiles militaires. En fait, les opérateurs ont réalisé, sur ordre de Moscou, un essai sur le réacteur, essai qui non seulement a complètement échoué mais a engendré la plus grande catastrophe civile de l'histoire du nucléaire. Suite à une accumulation d'actions humaines volontaires - *notamment des suppressions des systèmes de sûreté automatiques en vue de l'essai* -, le réacteur a fonctionné en zone de fonctionnement interdite, s'est emballé et a ainsi été détruit. Quelques secondes plus tard une seconde explosion détruisait une partie du bâtiment et des débris hautement radioactifs du réacteur étaient projetés dans les alentours immédiats, provoquant de nombreux incendies. Au contact de l'air, le graphite s'est enflammé et une quantité importante de produits radioactifs a été relâchée dans l'atmosphère.

La radioactivité, induite par l'accident de Tchernobyl et qui a atteint la Belgique, a été mesurée, elle était insignifiante et a eu un impact négligeable sur l'environnement.

Un accident comme Tchernobyl est impossible en Belgique, et ce pour trois raisons : le réacteur PWR est intrinsèquement stable contrairement au RBMK (qui peut s'emballer), le modérateur utilisé est de l'eau et non du graphite susceptible de s'enflammer et nos centrales disposent d'une double enceinte de confinement, totalement absente en Ukraine.

### Responsabilité civile et assurance couverture des centrales nucléaires

La responsabilité civile des exploitants nucléaires est régie par la loi du 22 juillet 1985. Elle comprend les dispositions en application de la Convention de Paris et de la Convention complémentaire de Bruxelles en matière de responsabilité civile dans le domaine nucléaire.

Cette loi stipule que les exploitants d'une installation nucléaire sont responsables des dommages causés par un accident nucléaire dans les limites des montants définis par la Convention.

En cas d'accident nucléaire, les exploitants peuvent être tenus responsables pour un montant de **300 millions d'euros**. Pour satisfaire à leurs obligations légales, ils ont souscrit une police d'assurance responsabilité civile auprès du Syndicat belge d'assurances nucléaires (SYBAN).

Pour les dommages au-delà de 300 millions d'euros, le système légal prévoit une intervention supplémentaire de l'Etat belge et des autres Etats signataires<sup>3</sup> à la Convention de Paris.

Entretemps, les Conventions de Paris et Bruxelles ont été modifiées en 2004 par plusieurs Protocoles destinés à assurer une meilleure couverture du risque nucléaire :

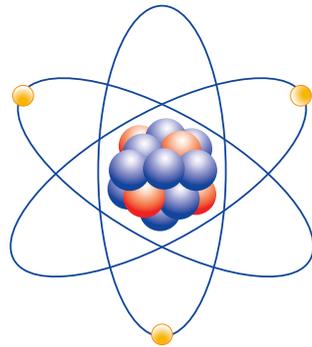
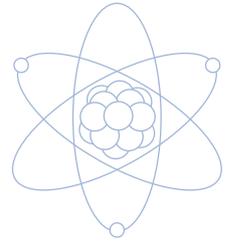
Le montant actuel de 300 millions d'euros que les exploitants nucléaires doivent assurer eux-mêmes sera porté à terme à **700 millions d'euros**.

L'intervention de l'Etat belge reviendra à **500 millions d'euros**.

Au-delà de ces montants s'ajoute une intervention des Etats signataires à la Convention de Paris pour un montant de **300 millions d'euros**.

Le montant total d'intervention pour la couverture du risque nucléaire, après révision des Conventions, s'élèvera donc à **1,5 milliard d'euros**.

Il est prévu que les modifications définies par les Protocoles de 2004 entrent en vigueur d'ici fin 2010.

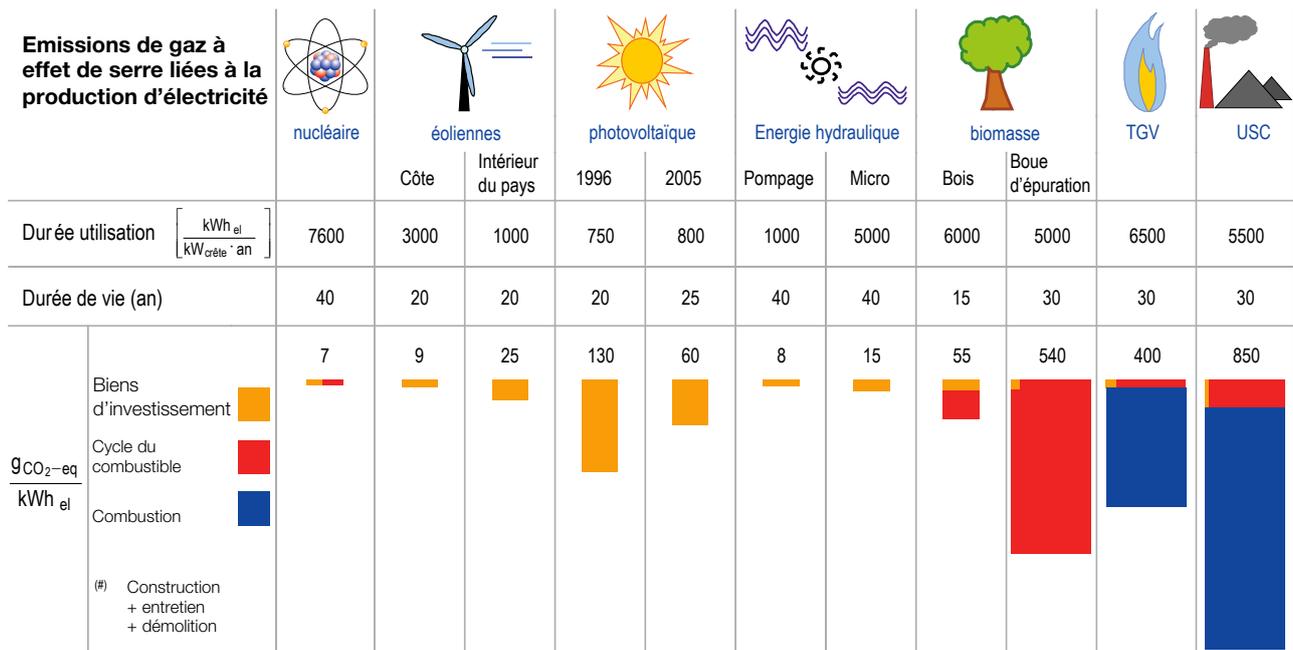


Contrairement aux idées largement répandues, l'industrie nucléaire civile peut, dans une certaine mesure, être considérée comme une énergie peu nuisible pour l'environnement. Si l'on examine la production d'électricité, contrairement aux centrales thermiques fonctionnant aux combustibles fossiles (charbon, gaz, pétrole), les centrales nucléaires ne génèrent pas, ou extrêmement peu, de gaz ou de particules qui contribuent à l'effet de serre, acidifient les pluies ou appauvrissent la couche d'ozone. Naturellement, cette industrie doit gérer les déchets nucléaires et les risques environnementaux.

## LES GAZ À EFFET DE SERRE LIÉS À LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Comme on peut le constater dans le schéma ci-dessous, ce sont les moyens de production nucléaire, éolien et hydraulique qui ne produisent pas (ou très peu) de CO<sub>2</sub>. Viennent ensuite les moyens de production photovoltaïque et biomasse. Il est intéressant d'observer que malgré un net progrès par rapport à des unités au charbon modernes, les centrales Turbine-Gaz-Vapeur (haut rendement) rejettent encore 400 g de CO<sub>2</sub> par kWh produit.

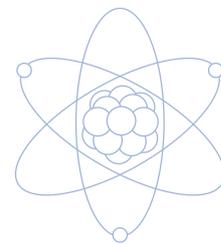
La production d'électricité représentait en 2006 environ 13 % des émissions de CO<sub>2</sub> nationales qui sont d'environ 150 millions de tonnes par an. Une projection montre qu'en Belgique, sans recours au nucléaire, la production de CO<sub>2</sub> due à la génération d'électricité serait largement supérieure. Dans le scénario du remplacement du nucléaire par le gaz naturel, les émissions de CO<sub>2</sub> seraient aujourd'hui accrues de près de 20 millions de tonnes par an. Et si un "mix" de combustibles avait été utilisé, le surplus s'établirait à près de 30 millions de tonnes.



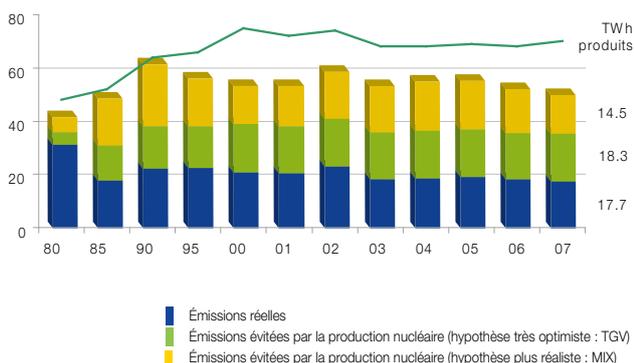
USC = centrales à charbon de nouvelle génération

Durée utilisation en heure par an

SOURCE : RAPPORT AMPERE



### Émissions de CO<sub>2</sub> pour le secteur de l'électricité en Belgique selon trois scénarios



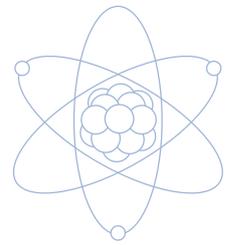
## Le Protocole de Kyoto

La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques adoptée à Rio en 1992 vise à "stabiliser [...] les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique". Pour y parvenir le protocole de Kyoto de 1997 prévoit, pour 38 pays industrialisés, de réduire de les émissions d'au moins 5 % par rapport au niveau de 1990 au cours de la période d'engagement allant de 2008 à 2012 (- 7 % pour les Etats-Unis, - 8 % pour l'Union européenne, - 6 % pour le Japon et la Canada, etc.). Bien qu'ils soient responsables de 25 % des émissions mondiales, les Etats-Unis ont refusé de ratifier le protocole. Au sein de l'Union Européenne, la charge est répartie entre les pays selon qu'ils polluent plus ou moins : l'Allemagne doit ainsi réduire ses émissions de 21 % alors que le Portugal pourrait théoriquement les augmenter de 27 %. Les pays signataires doivent mettre en place des politiques publiques pour améliorer l'efficacité énergétique, développer

l'utilisation des énergies renouvelables, et peuvent recourir à plusieurs mécanismes de flexibilité, dont celui de développement propre; ces derniers offrent aux pays industrialisés la possibilité de comptabiliser dans leur bilan national les investissements dans les pays en développement ou en Europe de l'Est qui permettent d'économiser les rejets de CO<sub>2</sub>. Mais depuis les accords de Marrakech, et à l'initiative de l'Union Européenne, les Etats "devront s'abstenir" d'intégrer le nucléaire dans ces mécanismes.

**Alors que l'Europe s'est fixée comme objectif de réduire ses émissions de CO<sub>2</sub> de - 20 à - 30 % à l'horizon 2020, l'Europe prête de plus en plus d'attention à la place du nucléaire dans un MIX énergétique équilibré.**

Ces dernières années, l'énergie nucléaire a fait l'objet de nombreux discours encourageants au sein des institutions européennes. En 2007, l'impression domine que, des paroles, on est passé aux actes et aux actions concrètes. Il ne suffit plus de dire que le nucléaire participera à la solution énergétique: il faut créer le contexte qui lui permettra d'en être.



Le second semestre 2007 a été le témoin de concrétisations d'initiatives européennes qui marquent réellement un changement de cap :

#### European Nuclear Energy Forum

A la fin du mois de novembre, s'est tenu à Bratislava (Slovaquie) le premier Forum européen de l'énergie nucléaire. Tous les grands thèmes du futur développement nucléaire européen sont abordés : gouvernance, finance, pénétration du marché, nouvelles constructions, opinion publique, recherche. Il s'agit bel et bien, par cet événement, de l'ouverture d'un débat public auquel pourra prendre part la société civile. L'énergie nucléaire sort en quelque sorte d'un "ghetto" où elle était reléguée.

#### Sustainable Nuclear Energy Technology Platform

Le 21 septembre 2007, la Commission européenne a lancé à Bruxelles la plate-forme technologique pour l'énergie nucléaire durable. Au niveau européen, il existe déjà une trentaine de ces plates-formes technologiques sectorielles. En leur sein, tous les acteurs de ces secteurs réfléchissent ensemble et au niveau de l'Europe aux meilleures voies de recherche et de développement pour l'avenir. C'est notamment cette

réflexion qui orientera les agendas stratégiques et les programmes-cadres européens en matière de recherche dans ce secteur. Lors de cet événement, le Commissaire à l'énergie, Andris Piebalgs a dit : "La reconnaissance de l'énergie nucléaire comme une source valide pour une économie à basse émission de carbone est menacée par une faible acceptation publique dans certains pays et même un rejet dans d'autres, attitudes souvent dues à un manque de connaissance et de transparence."

#### High Level Group on Nuclear Safety and Waste Management

Ce groupe à haut niveau sur la sûreté nucléaire et la gestion des déchets radioactifs s'est réuni pour la première fois à la mi-octobre 2007. Il est constitué de hauts fonctionnaires des autorités nationales de réglementation ou de sûreté nucléaire. Il doit développer une vision commune qui aidera la Commission européenne à déterminer les questions de sûreté à traiter en priorité. Il doit également l'assister dans l'élaboration progressive de règles européennes concernant la sûreté des installations nucléaires et la gestion sûre du combustible usé et des déchets radioactifs.

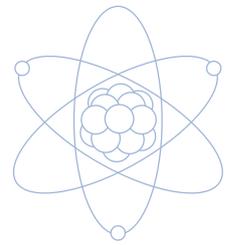
## LES EFFLUENTS

Les installations nucléaires, comme toutes les installations industrielles, rejettent des substances dans l'environnement. Il s'agit, en dépit des systèmes de filtration qui ne peuvent atteindre une efficacité de 100 %, d'effluents contenant des traces de radionucléides produits par fission et activation; il peut s'agir tant d'effluents gazeux (xénon 133, krypton 85, carbone 14, iode 131 et 129, tritium) que liquides (tritium, cobalt, nickel, etc.). Ces rejets radioactifs sont extrêmement faibles dans les conditions normales d'exploitation,

les travailleurs et les membres du public ne courant un risque réel qu'en cas d'accident majeur. L'impact des rejets annuels des centrales belges représente 0,01 mSv<sup>36</sup>, soit 0,1 % de la dose maximale imposée par la réglementation pour l'exposition artificielle (hors exposition médicale). Une dose à laquelle on n'a jamais observé d'effets car elle est de plusieurs ordres de grandeur inférieure à la radiation naturelle.

Qu'ils soient thermiques, chimiques ou radioactifs, les rejets de chaque installation sont réglementés et contrôlés par les exploitants et les autorités.

36. A titre de comparaison, on reçoit 0,14 mSv lors d'une radio pulmonaire et 6,8 lors d'une angiographie cardiaque.



## SURVEILLANCE DE L'ENVIRONNEMENT

L'implantation d'une installation nucléaire, comme celle de n'importe quel ouvrage industriel, influence inévitablement l'environnement. Cette influence se manifeste dans différents domaines : on pense souvent à l'impact radiologique mais il faut également considérer l'impact esthétique, l'impact sonore, la modification de la température, du régime et de la physico-chimie du cours d'eau, l'influence sur la vie aquatique, les rejets thermiques dans l'atmosphère, l'impact économique et social.

Plusieurs années avant le début de la construction d'un site nucléaire, une "étude d'impact" précise l'état initial du site, les différents types d'influences à prévoir et indique comment limiter les nuisances éventuelles.

Toutes les dispositions nécessaires sont alors prises lors de la conception, de la réalisation et de l'exploitation pour que l'installation puisse fonctionner en compatibilité avec le milieu dans lequel elle s'insère sans créer de risques pour la santé humaine.

La surveillance de l'environnement comprend donc différents aspects : thermique, chimique, acoustique, aquatique, paysager, socio-économique et radiologique. La surveillance radiologique de l'environnement n'est donc qu'un aspect parmi d'autres dans l'ensemble de la surveillance.

La radioactivité influence l'environnement aussi bien via les rejets liquides que via les rejets gazeux. Pour minimiser l'impact de ces rejets, plusieurs barrières, selon le principe des poupées russes, sont interposées entre les corps radioactifs et le milieu extérieur.

En routine, l'impact sanitaire des rejets liquides et gazeux d'un site nucléaire sur l'environnement est extrêmement faible. En effet, l'équivalent de dose reçue annuellement par la personne du public la plus exposée est inférieure de plusieurs ordres de grandeur à celui qu'elle reçoit de l'exposition naturelle.

Les mesures effectuées dans le cadre de la surveillance de l'environnement montrent que l'écosystème terrestre est très peu marqué par les rejets radioactifs des installations.

L'écosystème aquatique présente quant à lui quelques traces de radioéléments artificiels présents dans les effluents liquides que l'on peut retrouver dans les sédiments ou dans les mousses prélevées en aval des sites nucléaires ( $H^3$ ,  $Co^{58}$ ,  $Ag^{110m}$ ).

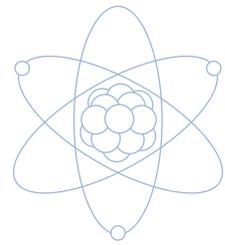
La surveillance de l'environnement assure trois fonctions techniques et une fonction d'information des autorités et du public.

Les trois fonctions techniques sont les suivantes : fonction d'alerte, fonction de contrôle et fonction de suivi et d'étude. La fonction d'alerte permet de prévenir dans un délai court, d'une anomalie nucléaire. Elle permet une réaction rapide en cas d'anomalie. La fonction de contrôle permet de s'assurer que la réglementation sanitaire est respectée. Elle compare des paramètres à des critères radiologiques. La fonction de suivi scientifique et d'étude permet de constater et de prévoir les évolutions.

A ces fonctions techniques s'ajoute une fonction d'information qui est primordiale principalement en situation inhabituelle, anormale ou accidentelle.

### Les réseaux automatiques d'alerte radiologique

Ces réseaux sont composés de balises de surveillance de l'air et des rivières qui fonctionnent avec une disponibilité supérieure à 99 % et qui sont capables de mettre en évidence les moindres variations de radioactivité du bruit de fond naturel. Elles surveillent les clôtures des installations nucléaires, les villages et les agglomérations voisines et l'ensemble du territoire. Les rivières sont surveillées de manière continue également. Les balises sont collectées par un système informatique et gérées par les autorités en charge de la radioprotection. En cas de panne ou d'alerte, des équipes d'intervention dotées de moyens mobiles interviennent rapidement.



Depuis l'accident de Tchernobyl, la plupart des pays européens se sont dotés de ce type d'infrastructure. Le réseau TELERAD ([www.telerad.fgov.be](http://www.telerad.fgov.be)) est le réseau automatique de télémessure de la radioactivité sur le territoire de la Belgique. Le réseau TELERAD est composé de 212 balises qui mesurent en permanence la radioactivité de l'air et des eaux de rivières. Les balises sont réparties sur l'ensemble du territoire national, autour des installations nucléaires de Tihange, Doel, Mol, Fleurus et Chooz, ainsi que dans les agglomérations proches de ces installations.

Le réseau poursuit deux objectifs majeurs: le déclenchement d'une alarme pour signaler sans délai une situation anormale et l'enregistrement en continu des mesures pour fournir tout renseignement statistique concernant les niveaux de rayonnement relevés dans le pays. Le réseau TELERAD est donc en premier lieu un réseau d'alarme qui permet de détecter, en temps réel, toute situation anormale qui peut, selon son degré de sévérité, conduire à l'application du Plan d'Urgence Nucléaire. En cas d'accident nucléaire, le réseau TELERAD jouerait un rôle important dans la prise de décision, dans l'optimisation des interventions et des contre-mesures mises en oeuvre par les autorités compétentes ainsi que pour l'information continue des citoyens. Le réseau TELERAD comprend aussi des appareils météorologiques; les informations fournies par cet appareillage "météo" permettent la modélisation de l'atmosphère en situation accidentelle, comme en situation normale.

### La surveillance et le contrôle de la radioactivité du territoire

L'exploitant est tenu de contrôler tous les effluents qu'il rejette, il est surveillé par les autorités. L'environnement ou le milieu dans lequel ont lieu les rejets est surveillé par les pouvoirs publics qui mettent en place une série de contrôle du rayonnement ambiant, des poussières atmosphériques, de l'eau de pluie, des eaux de rivières, des eaux de boissons, des sols, des végétaux et du lait. La chaîne alimentaire et le "panier de la ménagère" sont également analysés dans les laboratoires de métrologie

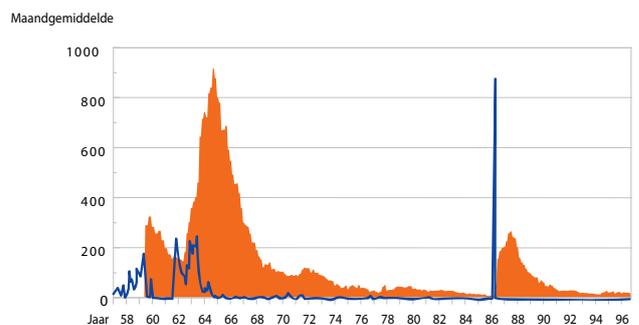
bas niveau du pays sous le contrôle et pour le compte des autorités. Ces contrôles systématiques fournissent des informations régulières sur la contamination du territoire.

### Le suivi radioécologique

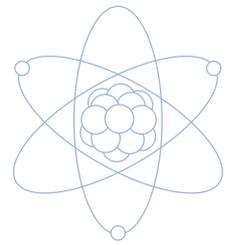
L'étude scientifique du cheminement et du devenir des radioéléments libérés dans l'environnement (la radioécologie) a pour but de déterminer, depuis les sources d'émission, les voies et les modalités d'atteinte à l'homme. D'une manière générale, le déroulement des études radioécologiques comporte plusieurs phases: - un bilan avant démarrage du site ou de l'installation appelée zéro radioécologique - un bilan décennal - un suivi annuel des principaux indicateurs du milieu terrestre et aquatique - des études ponctuelles à la demande.

### Conclusions

Les données fournies en permanence par le réseau automatique par les exploitants et par le programme de surveillance du territoire montrent que l'impact des rejets liquides et gazeux d'un site nucléaire sur l'environnement est très faible (l'équivalent de dose reçue annuellement par la personne la plus exposée - l'individu critique - est de plusieurs ordres de grandeur inférieurs à celui qu'il reçoit de l'exposition naturelle). Les contrôles effectués dans le cadre de la surveillance de l'environnement confirment que l'impact des installations nucléaires est négligeable, si on les compare à la radioactivité naturelle, aux restes du fallout des essais militaires (période avant 1968) ou la signature de l'accident de Tchernobyl (les quelques années immédiatement après 1986).



Cesium-137 lichaamsbesmetting in België (Bq)  
Activiteit van het luchtstof (mBq/m³)



## LES DÉCHETS NUCLÉAIRES

Toute activité humaine génère des déchets, c'est-à-dire des produits sans utilité, qu'ils soient nocifs ou pas. Qu'elles soient industrielles, scientifiques ou médicales, les activités nucléaires n'échappent pas à la règle, et certains des déchets qu'elles produisent sont radioactifs<sup>37</sup>, parfois nettement plus radioactifs que les substances que l'on trouve naturellement dans l'environnement.

### L'ONDRAF gère, les producteurs financent

En Belgique, la gestion des déchets radioactifs est confiée par la loi à un organisme public: l'ONDRAF (Organisme National des Déchets RAdioactifs et des matières Fissiles enrichies); de leur côté, les producteurs de déchets radioactifs - qu'ils soient industriels, scientifiques ou médicaux - assument leurs responsabilités quant au financement de cette gestion. En particulier, le coût du kWh nucléaire intègre les coûts aussi bien actuels que futurs liés à la gestion du cycle du combustible. La loi du 11 avril 2003 sur les provisions nucléaires donne à SYNATOM<sup>38</sup> la mission de gérer les provisions pour la gestion du combustible irradié et pour le démantèlement des centrales nucléaires; en particulier, elle doit assurer que le montant des provisions est suffisant et disponible.

**La responsabilité finale du financement des provisions incombe à l'exploitant**, même si les montants provisionnés ne sont pas suffisants. L'évaluation de ces provisions est basée, d'une part, sur des coûts actuels et donc connus et, d'autre part, sur des estimations, majorées d'une marge d'incertitude évaluée au cas par cas.

### L'ONDRAF

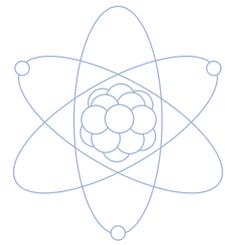
Soucieux de mettre en place un système de gestion centralisée et sûre des déchets radioactifs en Belgique, le législateur créait en 1980 l'Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies (ONDRAF). En tant qu'organisme public, l'ONDRAF n'a pas de but lucratif. Il exécute ses missions au prix coûtant, faisant payer aux producteurs (centrales nucléaires, hôpitaux, laboratoires, etc.) le prix nécessaire pour assurer une gestion sûre à court et à long terme de leurs déchets et donc garantir la sécurité des populations présentes et futures.

L'ONDRAF est chargé, selon les lois du 8 août 1980, du 11 janvier 1991 et du 12 décembre 1997, de mettre au point une solution définitive pour l'élimination (mise en dépôt définitif) de l'ensemble des déchets radioactifs en Belgique de faible, moyenne et haute activité.

L'ONDRAF est responsable de la gestion de tous les déchets radioactifs présents sur le territoire belge. Il a pour tâche de mettre au point une gestion cohérente et sûre de ces déchets, laquelle comprend les aspects suivants: l'inventaire, l'enlèvement et le transport, le traitement, l'entreposage provisoire, la gestion à long terme, ainsi que des missions de démantèlement et de gestion des matières fissiles enrichies.

37. Ils contiennent des substances qui émettent des rayonnements ionisants sous la forme de rayons alpha (noyaux d'hélium), bêta (les électrons notamment) ou gamma (ondes électromagnétiques).

38. SYNATOM gère l'ensemble du cycle du combustible pour les centrales nucléaires belges.



## Trois catégories

L'ONDRAF classe les déchets radioactifs selon deux critères :

- 1. La quantité des substances radioactives contenue dans les déchets, combinée à la nature de l'émission radioactive.** Ce critère est exprimé en activité des déchets (haute, moyenne ou faible).
- 2. La durée du risque** (liée directement à la radioactivité), qui dépend de l'affaiblissement de la radioactivité et est exprimée en période radioactive (courte ou longue, voir le chapitre 2), communément appelée période de demi-vie.

**Catégorie A** ou déchets de faible ou moyenne activité à courte durée de vie

Cette catégorie comprend les déchets de faible ou moyenne activité dont la demi-vie est inférieure à 30 ans; cela signifie que le niveau de radioactivité de ces déchets est comparable au niveau de radioactivité ambiant après maximum 300 ans. Ces déchets proviennent de l'exploitation courante ainsi que du démantèlement des centrales nucléaires, de la fabrication et de l'utilisation d'éléments radioactifs à des fins médicales, industrielles ou de recherche. Rentrent dans cette catégorie principalement des matériaux ayant été en contact avec des produits radioactifs (gants, combinaisons, récipients, etc.).

**Catégorie B** ou déchets de faible ou moyenne activité à longue durée de vie

Cette catégorie comprend des déchets contenant certains émetteurs à longue durée de vie (demi-vie supérieure à 30 ans) en quantités trop importantes pour qu'ils puissent être classés dans la catégorie A. Ces déchets sont produits lors du cycle du combustible, principalement lors de la fabrication des assemblages ainsi que lors du retraitement du combustible irradié.

**Catégorie C** ou déchets de haute et très haute activité

La catégorie C comprend les déchets de haute activité et de très longue durée de vie (dans la plupart des cas, plusieurs milliers d'années). Cette catégorie comprend d'importantes quantités de radioéléments émetteurs de rayonnements bêta et alpha. Ils proviennent surtout de la fission du combustible nucléaire. Ceux-ci dégagent de la chaleur (appelée chaleur résiduelle) qui doit diminuer de façon suffisante que pour être mis en dépôt profond (voir p. 85).

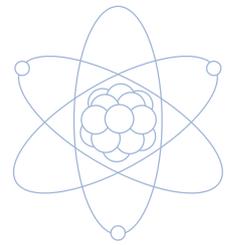
## Une gestion responsable des déchets radioactifs

Une gestion responsable permet d'isoler les déchets de l'environnement durant le temps nécessaire pour que leur niveau d'activité diminue, par décroissance naturelle, jusqu'à un niveau suffisamment bas. Les principes de la gestion des déchets radioactifs s'apparentent à ceux de la gestion des déchets industriels et ménagers: ils comprennent différents aspects, comme la réduction de volume, le tri, la récupération, etc., en tenant compte de la spécificité des matières traitées.

Le traitement est l'opération qui consiste à mettre le déchet (liquide ou solide) sous une forme stable et solide. Le conditionnement est l'opération par laquelle un déchet traité est placé dans un conteneur approprié permettant d'assurer sa manutention, sans contact avec son contenu et sans dispersion des éléments radioactifs qu'il contient.

**Déchets de faible et moyenne activité à courte durée de vie**

L'ONDRAF organise l'enlèvement des déchets chez la plupart des producteurs. Ces déchets sont inventoriés et transportés vers les installations de traitement et de conditionnement de BELGOPROCESS à Dessel. Certains producteurs disposent d'installations leur permettant de traiter eux-mêmes une bonne partie de leurs déchets. Dans ce cas, le produit final est transporté vers les installations d'entreposage centrales de BELGOPROCESS.



Les transports sont effectués par des firmes spécialisées qui disposent du matériel requis et des autorisations de transport délivrées par l'AFCN. Pour réduire le volume des déchets radioactifs, on a recours à différentes techniques<sup>39</sup>. Le traitement terminé, les produits intermédiaires sont conditionnés; ils sont enrobés dans du ciment (cas des boues) ou du bitume (cendres, déchets métalliques)

de manière à former un tout solide. Ces blocs sont ensuite enfermés dans des fûts métalliques. Les fûts facilitent la manipulation lors des phases ultérieures de la gestion. Chaque fût est muni d'une identification de manière à pouvoir contrôler à tout moment la nature et l'origine des déchets qu'il contient.

Dès la signature du moratoire de Londres en 1982 qui suspendait pour dix ans l'immersion en mer des déchets radioactifs, l'ONDRAF s'est penché sur la recherche d'une solution terrestre pour l'élimination des déchets de faible activité. A l'époque trois options avaient été retenues: dépôt définitif sur un site de surface "géologiquement favorable", dépôt définitif dans les mines du Limbourg (après arrêt de l'exploitation charbonnière) et dépôt définitif en formation argileuse profonde. En 1990, l'évacuation dans les mines du Limbourg a été écartée en raison du risque potentiel de contamination des nappes aquifères souterraines. En juin 1997, l'ONDRAF publiait un rapport<sup>40</sup> sur les options techniques en matière de gestion à long terme des déchets de faible

activité et de courte durée de vie.

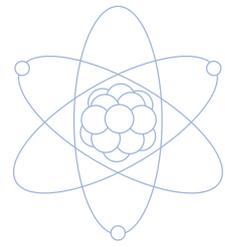
Le 16 janvier 1998, le Gouvernement faisait un choix stratégique: opter pour une solution progressive, flexible, réversible et qui pouvait devenir définitive à terme. Seuls les concepts de "stockage définitif en surface"<sup>41</sup> et de "stockage définitif en profondeur"<sup>42</sup> ont été retenus. L'ONDRAF a alors été chargé d'approfondir et de finaliser les deux concepts, de développer une méthodologie permettant d'intégrer un projet de cette nature au niveau local (impliquer la population, de façon à pouvoir répondre à leurs préoccupations et souhaits) et de se limiter aux zones nucléaires existantes (Doel, Fleurus, Mol-Dessel et Tihange).

39. Les déchets radioactifs liquides sont traités de manière chimique (via fixation des substances radioactives) ou thermique (via ébullition qui laisse des boues radioactives comme résidu). Les déchets radioactifs solides qui sont combustibles sont portés à une température de 900°C et réduits en cendres dans un incinérateur industriel. Les gaz de fumée sont filtrés et rejetés à l'atmosphère. Les déchets radioactifs solides qui ne sont pas combustibles sont compactés sous haute pression. S'ils sont non compressibles, ils sont découpés en morceaux que l'on introduit dans des fûts standard. Les déchets radioactifs solides non combustibles, pour autant qu'ils soient compressibles, sont rassemblés dans des fûts en acier et compactés sous très haute pression (2 000 tonnes); le produit obtenu est une galette d'environ 25 cm d'épaisseur. Les déchets non compressibles sont découpés en morceaux que l'on peut introduire dans des fûts de dimensions standard.

40. Ce rapport soulignait que la société devait s'interroger sur le long terme et définir une stratégie de gestion sur la base de deux principes éthiques: premièrement, les effets prévisibles sur la santé des générations futures ne peuvent être supérieurs aux niveaux jugés acceptables aujourd'hui; deuxièmement, la génération actuelle ne peut imposer des charges excessives aux générations futures.

41. Le stockage définitif en surface est entièrement basé sur le principe des blindages multiples, comme dans des poupées russes où la plus petite est protégée par toutes les autres. Dès qu'il est décidé de fermer un module de dépôt en béton, les colis de déchets faiblement actifs sont protégés artificiellement par différentes couches de couverture imperméables. La conception de l'ensemble garantit un impact radiologique très inférieur à la radioactivité naturelle.

42. Dans l'option du stockage définitif en profondeur, la sûreté à long terme est assurée par la roche hôte abritant le dispositif de dépôt. La roche hôte actuellement étudiée en Belgique est l'argile. Celle-ci est favorable, car elle est peu perméable, possède de bonnes propriétés d'absorption et neutralise la formation de fissures grâce à son caractère plastique. Les essais de construction effectués dans le laboratoire souterrain situé à 230 m de profondeur à Mol démontrent qu'il est possible de creuser industriellement des galeries d'un diamètre approprié dans l'argile.

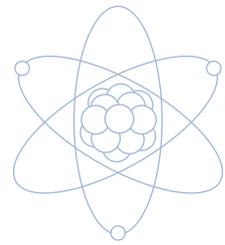


Le conseil des ministres du 23 juin 2006 a décidé qu'ils seront mis en dépôt final dans une installation de dépôt en surface sur le territoire de la commune de Dessel. Cette décision résulte d'abord d'un choix sociétal. Les communes de Dessel et Mol s'étaient déclarées disposées à envisager la réalisation, sur leur territoire, de l'installation de dépôt en surface ou de l'installation de dépôt en profondeur,

que leurs partenariats<sup>43</sup> respectifs STOLA-Dessel et MONA avaient développées, moyennant le respect des conditions associées à l'implantation de ces installations. L'exploitation du site devrait débuter à l'horizon 2015. D'ici-là, les déchets de catégorie A sont entreposés sur le site de Belgoprocess, filiale de l'ONDRAF, à Dessel.



43. Les partenariats sont des structures créées sous forme d'ASBL destinées à gérer, le plus ouvertement possible et de la manière la plus proche des populations locales, le travail de préétude nécessaire à la constitution de projets de dépôts définitifs de déchets de faible activité et moyenne activité à courte demi-vie. STOLA-Dessel a été transformé en STORA: "Studie- en Overleg Radioactief Afval Dessel". Cette ASBL suit l'exécution des décisions gouvernementales portant sur le dépôt définitif de déchets de faible et moyenne activité à courte demi-vie et assure la mission plus large du suivi de toutes les autres sortes de déchets radioactifs.



### Déchets radioactifs de haute activité

Pour les déchets radioactifs de haute activité (catégorie C), de vastes programmes de recherche et développement ont été mis en oeuvre afin d'étudier les diverses options possibles pour leur stockage définitif. Ces programmes scientifiques, qui font souvent l'objet d'une étroite coopération internationale, poursuivent tous une même approche, à savoir la construction d'infrastructures de dépôt définitif dans des couches géologiques profondes et stables, ayant prouvé leur capacité d'isolation depuis des millions d'années<sup>44</sup> ou s'avérant capables de limiter la migration des radionucléides vers la biosphère. En outre, les caractéristiques intrinsèques de ces couches doivent renforcer le rôle des barrières artificielles (constituées par exemple par le verre des déchets vitrifiés, le conteneur, ainsi que les autres barrières ad hoc) pour assurer un confinement efficace des déchets.

Les concepts et scénarios de la gestion des déchets radioactifs développés par l'ONDRAF accordent tel que demandé par les autorités belges une grande importance à la progressivité et à la réversibilité de la réalisation. Tout le processus décisionnel qui entoure le choix technique, la construction, l'exploitation et la fermeture de l'installation de dépôt se déroulera de façon progressive et toutes les parties concernées seront impliquées dans les prises de décision à chacune des étapes.

En collaboration avec la Commission des Communautés européennes et le CEN (Centre d'Etude Nucléaire, à Mol), l'ONDRAF étudie actuellement la construction d'une infrastructure de dépôt définitif dans des couches

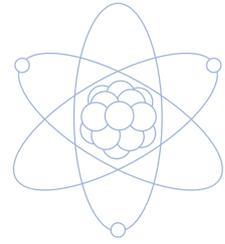


d'argile qui possèdent d'excellentes propriétés de rétention des radioéléments et offrent une protection efficace à très long terme. Afin de mener les expériences au cœur du massif argileux, un laboratoire pilote dans l'argile de Boom, connu

sous le nom de HADES (High Activity Disposal Experimental Site), a été construit à 230 mètres sous le site du CEN•SCK. Aujourd'hui, le CEN•SCK et l'ONDRAF, réunis dans un Groupement d'Intérêt Economique EURIDICE achèvent la réalisation d'une extension du laboratoire baptisée PRACLAY. Dans ce dernier est mené tout un programme d'expérimentation. Les expériences, dont les premiers résultats sont attendus à l'horizon 2013, visent à simuler un dépôt de déchets dans l'argile, analyser notamment les effets sur l'argile environnante et doivent montrer la faisabilité technique et pratique de la mise en dépôt final dans l'argile.

Concernant le timing, ces déchets nucléaires présentent la caractéristique de ne pouvoir être stocké définitivement qu'après une période de refroidissement d'une cinquantaine d'année. Dans l'attente de leur stockage définitif, le combustible usé est stocké temporairement sur les sites nucléaires de Doel et de Tihange. En ce qui concerne les déchets vitrifiés qui sont revenus du site de La Hague en France, ils sont entreposés de manière sûre dans un bâtiment de Belgoproprocess (voir p. 57).

44. Les hypothèses utilisées pour évaluer la sûreté des dépôts ont été validées dans la nature elle-même. Il y a environ deux milliards d'années au Gabon (gisement d'Oklo), plusieurs (13) réacteurs nucléaires naturels ont fonctionné par intermittence pendant plusieurs millions d'années, en travers d'un gisement naturel du minerai d'uranium. On a constaté que les produits de fission engendrés par ces réactions nucléaires ne se sont pas déplacés de plus de quelques centimètres de leur lieu d'origine. De plus, d'autres phénomènes importants pour le stockage géologique, de natures aussi diverses que la corrosion des métaux, l'évolution des propriétés des argiles, la migration des matières dissoutes dans divers milieux, l'absorption chimique et le changement climatique à long terme, sont étudiés dans des analogues naturels, permettant ainsi de vérifier les connaissances sur des processus qui sont extrêmement lents ou d'une trop vaste envergure pour être directement mesurés en laboratoire ou in situ.



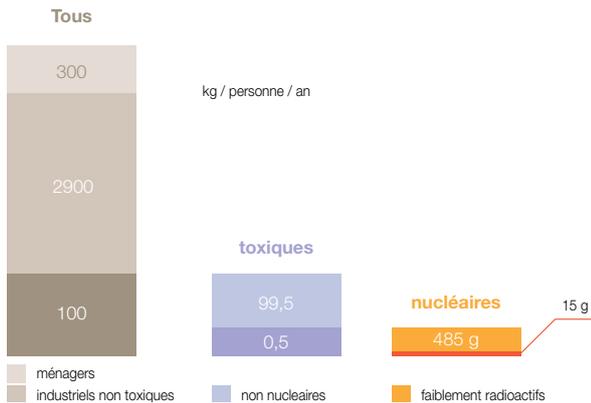
## Volume de déchets nucléaires

Les déchets radioactifs constituent une infime partie du volume total de déchets produits en Belgique: sur la totalité des déchets produits par habitant belge et par an, 3% (soit 100 kg) sont des déchets toxiques, 0,015 % (soit 0,5 kg) sont radioactifs et 0,0005 % (soit 15 g) sont de haute activité.

Selon l'ONDRAF, le volume de déchets radioactifs à gérer en Belgique d'ici 2070 (et selon un scénario de référence) sera de :

- 70 500 m<sup>3</sup> de déchets de catégorie A (déchets faiblement ou moyennement radioactifs et de courte durée de vie)
- 8 900 m<sup>3</sup> de déchets de catégorie B (déchets faiblement ou moyennement radioactifs et de longue durée de vie)
- de 2 100 à 4 700 m<sup>3</sup> de déchets de catégorie C (déchets hautement radioactifs et de longue durée de vie)

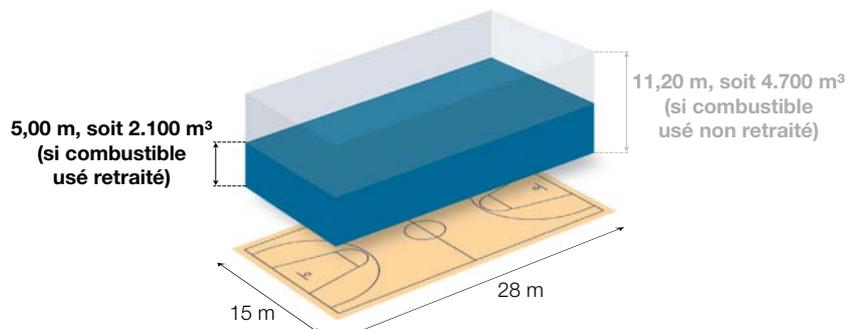
### Production annuelle de déchets en Belgique

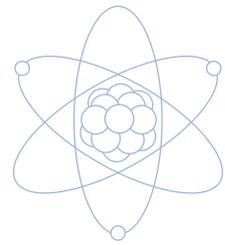


En d'autres termes et toujours en prenant en compte les 40 années d'exploitation des réacteurs belges (correspondant à environ 55% de la production électrique belge), le volume de déchets de haute activité représente en Belgique l'équivalent d'une ou deux balles de tennis par personne.

Par ailleurs, prolonger la durée de vie des centrales nucléaires belges n'a pas d'impact sur la gestion des déchets nucléaires et n'a qu'un impact limité sur la quantité totale de déchets produits par le cycle du combustible, la plus grande partie venant du démantèlement des centrales.

### Volume de déchets nucléaires de haute activité pour une période de 40 années d'exploitation des centrales nucléaires belges





## Et la transmutation?

Le principe de la transmutation appliquée au traitement des déchets radioactifs consiste à irradier les noyaux d'éléments à vie longue pour les transformer en corps stables ou en éléments radioactifs à 1/2 vie plus courte et/ou présentant une radiotoxicité moindre.

Bombardés par des neutrons, des protons ou des photons, certains noyaux peuvent se transformer en autres éléments. Cette réaction nucléaire classique vulgarisée sous le vocable «transmutation» pourrait être mise en œuvre dans des installations comme des réacteurs, des systèmes sous critiques ou des accélérateurs afin de changer des actinides mineurs (neptunium, américium et curium) à durée de vie longue en d'autres éléments radioactifs à durée de vie plus courte ou émetteurs de rayonnements différents. Les réacteurs à neutrons rapides seront, en théorie, capables d'éliminer certains éléments fortement radiotoxiques contenus dans le combustible usé actuel. Des protons de haute énergie ou des photons pourraient être utilisés également ainsi que des installations sous critiques. Il faut toutefois être conscient que cette approche de la transmutation implique le développement, en amont de l'installation d'irradiation, d'une industrie spécifique pour l'élimination des lanthanides et pour la séparation isotopique des éléments à transmuter.

Les recherches portent entre autres sur des éléments comme le  $^{99}\text{Tc}$  dont la période radioactive est de 210 000

ans qui pourraient être transformées en  $^{100}\text{Tc}$  par capture neutronique (neutrons thermiques) celui-ci a une demi-vie de 15,8 secondes et décroît en  $^{100}\text{Ru}$  qui est stable. A côté des aspects techniques, la faisabilité industrielle doit être analysée et il faut encore démontrer qu'il y a un avantage global significatif à cette recherche. Il s'agit en effet d'évaluer l'impact sur l'environnement (rejets radioactifs gazeux et liquides) et l'économie du cycle.

L' $\text{Am}^{241}$  et d'autres actinides comme le  $^{244}\text{Cm}$  sont également étudiés mais de nombreuses questions techniques restent à résoudre: le multirecyclage, la pyrochimie, les réacteurs à neutrons rapides ou les installations mixtes couplant un accélérateur de particules et un réacteur sous critique (comme dans le projet MYRRHA à Mol) sont encore à développer. Les cibles spécifiques sont également encore à concevoir.

Les combustibles usés ne sont pas des déchets, ils sont composés pour 96% de matières présentant un potentiel énergétique valorisable. Une fois l'U et le Pu séparés, les actinides mineurs Np, Am, Cm subsistent mélangés aux produits de fission ou d'activation qui sont nombreux et variés. Pour les séparer, une approche élément par élément est indispensable, il faut donc mettre au point des procédés de séparation poussés dans lesquels la pyrochimie est une voie d'avenir. Il s'agit d'opérations de métallurgie à haute température qui se déroulent en milieux non aqueux (sels fondus).



# Conclusion

## nucléaire, vecteur de progrès

La radioactivité est présente partout. Sans elle, nous n'existerions pas. D'abord parce que sans les réactions de fusion des noyaux d'hydrogène, les étoiles ne brilleraient pas et l'univers ne contiendrait que de l'hydrogène. Ensuite parce que notre planète serait depuis longtemps froide; c'est grâce à la chaleur interne de la Terre, dégagée essentiellement par les désintégrations radioactives qui s'y produisent, que des conditions clémentes ont été maintenues. La vie se développe dans un bain constant de rayonnements, s'adapte, se diversifie et évolue grâce à eux. La radioactivité est omniprésente dans notre vie quotidienne. Nous ne soupçonnons pas sa présence, mais nous la rencontrons constamment: en escaladant les sommets tout comme en allant à la cave chercher du vin, ou en prenant l'avion. Nous sommes nous-mêmes radioactifs du fait de la présence d'éléments naturellement radioactifs dans notre alimentation ou constituants de notre corps, comme le potassium.

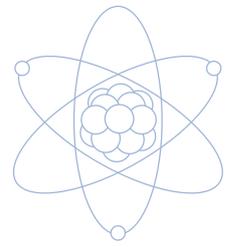
La radioactivité est aussi largement utilisée dans notre vie de tous les jours. Elle constitue un outil irremplaçable pour la médecine. Elle a apporté une révolution dans les explorations et les traitements des fonctions du vivant; les médecins disposent d'une panoplie de techniques difficilement imaginables il y a seulement une génération. Les progrès récents permettent une action de plus en plus sélective. En radiothérapie, il est maintenant possible de concentrer l'énergie et la localisation du rayonnement sur les cellules malades, en évitant au maximum de toucher les cellules saines.

Une autre application importante de l'énergie nucléaire est bien-sûr la production d'électricité qui, en Belgique, provient pour plus de la moitié des centrales nucléaires. Outre la production proprement dite d'énergie, cette industrie a induit, depuis un siècle, un véritable essor en Recherche & Développement, qui a profité directement à une multitude de domaines: du génie civil à l'électronique en passant par l'élaboration de matériaux,

la médecine et en allant jusqu'à l'étude approfondie des états bi- et triphasiques de liquides. L'industrie et la recherche nucléaire compte environ 4 500 emplois directs en Belgique. Tous secteurs confondus, 20 000 travailleurs emploient professionnellement les propriétés des radiations ionisantes, la grosse majorité provenant du secteur médical.

Dans le domaine nucléaire, la sûreté a toujours été une préoccupation essentielle du monde scientifique et des industriels. Il n'y a pas d'autre exemple, dans l'histoire de la technique du monde occidental, à part peut-être celui de l'aviation, d'une technologie où la sûreté a joué un rôle aussi important au cours de son développement. Les progrès technologiques, la qualification et la formation du personnel, les mesures de gestion des accidents, une efficacité réglementaire renforcée et une expérience de dizaines d'années ont permis de faire du nucléaire une technologie mature. Le domaine nucléaire est un des plus contrôlés au monde; au-delà des obligations légales dans le chef des exploitants nucléaires, des contrôles stricts, au niveau national et international, sont organisés par des structures indépendantes. C'est ainsi que l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA) a instauré des normes internationales de sûreté et joue un rôle important dans le maintien et le partage de la connaissance à l'échelle mondiale. C'est ainsi aussi qu'à été mis en place un Traité universel, le premier du genre et signé par 187 pays, de non-prolifération de matières fissiles qui pourraient être utilisées à des fins non-pacifiques.

Dans ce contexte, pour une utilisation harmonieuse de l'énergie nucléaire, il faut répondre aux préoccupations du public concernant l'impact sanitaire des activités nucléaires, en particulier celui de la gestion des déchets. Le fait même de parler d'un "problème" pourrait laisser penser que celui-ci n'a pas de solution. Or les solutions existent; les exigences dans le



domaine des déchets sont fortes, et pour le long terme, l'Organisme National des Déchets Radioactifs et des matières Fissiles enrichies (ONDRAF), avec de nombreux partenaires de recherches, développe des solutions techniques efficaces et sûres ainsi qu'un processus démocratique pour gérer les déchets radioactifs. En fait, si quelques pays nucléaires n'ont pas encore choisi une ou des formules de gestion à long terme des déchets nucléaires de haute activité, c'est d'abord parce qu'en l'absence d'urgence (ces déchets doivent "refroidir" une cinquantaine d'années), ils souhaitent choisir la ou les solutions les plus abouties sur le plan scientifique. Ces déchets, dits de vie longue et représentant environ 5 % de la quantité totale des déchets nucléaires (mais 99 % de la radioactivité), sont entreposés provisoirement en toute sûreté. Quant aux déchets de faible activité – 95 % de la quantité totale et 1 % de la radioactivité –, leur radioactivité sera revenue au niveau de la radioactivité naturelle en moins de 300 ans et leur gestion ne pose pas de souci. Le gouvernement belge a décidé<sup>45</sup> de leur dépôt en surface dans la commune de Dessel. La quantité totale de déchets nucléaires de haute activité pour une période de 40 années d'exploitation des 7 centrales nucléaires belges (55 % de la production totale d'électricité) représente l'équivalent du volume d'une balle de tennis par habitant belge. Sans oblitérer la nécessité des précautions les plus grandes, les déchets nucléaires constituent avant tout un problème exacerbé et émotionnel.

Le nucléaire n'est pas nécessairement bien perçu par le grand public. Et pour cause, les "freins" psychologiques sont nombreux : armes et terrorisme, changement de cap trop rapide après la crise pétrolière de 1973, peu d'information objective disponible ou perçue comme opaque voire arrogante, beaucoup d'amalgames ressassés par certains groupes d'intérêt, peur du risque, etc. L'accident de Tchernobyl a freiné considérablement le développement électro-nucléaire, du moins jusqu'à il y a peu. Mais les temps changent, les mentalités aussi. Les incertitudes géopolitiques, le spectre de l'épuisement des ressources

fossiles face au boom de la demande, l'augmentation des risques associés – volatilités des prix des combustibles, envolée de la facture énergétique, crainte de la pénurie, black-out, etc. – sont autant d'éléments qui (re)donnent à l'énergie sa pertinence sociétale. Mais surtout Kyoto et les objectifs fixés par l'Union européenne à l'horizon 2020 font désormais de la lutte contre le changement climatique une obligation. De plus en plus de voix, issues du milieu politique, académique ou associatif, s'élèvent dès lors pour reconsidérer la position de l'énergie nucléaire en tant qu'option sérieuse dans le cadre du développement durable; pas seulement pour l'aspect écologique mais aussi pour des raisons économiques et de sécurité d'approvisionnement.

L'Homme n'a pas inventé la radioactivité mais depuis plus d'un siècle maintenant, l'approfondissement des connaissances du noyau a permis l'accroissement spectaculaire de la technologie de production d'électricité, de la fabrication d'isotopes à buts médicaux et industriels, de la compréhension des phénomènes radioactifs qui baignent l'univers et de leur impact sur la biosphère et l'homme. C'est le cas aussi, malheureusement, des "applications" militaires.

Il importe que les décisions relatives au domaine nucléaire incorporent toutes les dimensions : scientifique, environnementale, économique et sociétale. La compréhension des questions nucléaires s'inscrit dans le domaine plus vaste de l'attitude du public à l'égard de l'énergie en général, qui nous concerne tous. Il est donc primordial que les acteurs concernés, les autorités en tête, s'attachent à prendre en compte les craintes du public et à réduire le fossé existant entre les chercheurs et experts d'un côté, et le public de l'autre. Le nucléaire, vecteur de progrès, recèle encore de nombreux aspects prometteurs, il continuera d'étonner, voire de faire rêver, comme c'était le cas au début de son développement. C'est dans l'espoir d'une prise de conscience objective sur ses différentes facettes que ce tour d'horizon sur l'énergie nucléaire se termine.

45. De nombreux pays stockent définitivement leurs déchets de basse et moyenne activité à durée de vie courte, il s'agit, entre autres, des Pays-Bas, de la France, de l'Espagne, de la Suisse, de l'Angleterre, de la Finlande, de la Suède, des Etats-Unis ou encore du Japon.

## GLOSSAIRE DES TERMES UTILISÉS

**Activité:** nombre de noyaux qui se transforment en une seconde.

**AEN:** fondée en 1958, l'Agence Européenne pour l'énergie Nucléaire (AEN) est devenue depuis 1972, l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire. Elle regroupe tous les pays européens membres de l'OCDE ainsi que l'Australie, le Canada, les Etats-Unis et le Japon. L'AEN "s'efforce de promouvoir des entreprises communes, d'harmoniser les activités dans certains domaines et de créer un régime juridique et administratif européen de l'énergie nucléaire".

**AFCN:** l'Agence Fédérale de Contrôle Nucléaire (AFCN) est un établissement public. L'Agence 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.

**AIEA:** l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (Vienne) a été constituée en 1957 pour "encourager, faciliter, dans le monde entier, le développement de l'utilisation pratique de l'énergie atomique à des fins pacifiques et la recherche en ce domaine". L'AIEA est une organisation placée sous l'égide des Nations unies.

**Bel V:** organisme belge agréé pour effectuer le contrôle permanent des grandes installations nucléaires, dont les centrales nucléaires, le SCK•CEN, Belgonucleaire, Belgoprocess et l'IRE.

**AVC:** AIB-Vinçotte Controlatom. Organisme agréé pour effectuer des contrôles d'installations nucléaires en Belgique.

**Becquerel:** unité d'activité correspondant à une désintégration par seconde.

**BR1:** Belgian Reactor 1, réacteur de recherche (SCK•CEN).

**BR2:** Belgian Reactor 2, réacteur d'essais des matériaux (SCK•CEN).

**BR3:** Belgian Reactor 3, réacteurs prototype PWR (SCK•CEN) en cours de démantèlement.

**Caloporteur:** porteur de chaleur. Fluide (gaz, eau ou sodium liquide) qui évacue la chaleur produite dans le cœur du réacteur. En Belgique, il s'agit d'eau.

**SCK•CEN:** Centre d'Etude de l'énergie Nucléaire basé à Mol et créé en 1952.

**Combustible nucléaire:** élément qui, à partir d'une réaction en chaîne contrôlée, libère de la chaleur. Dans le cas de fission nucléaire, il peut s'agir d'uranium naturel, d'uranium faiblement enrichi, d'uranium enrichi de plutonium ou bien thorium.

**Cycle du combustible nucléaire:** ensemble des opérations industrielles qui vont de l'extraction de l'uranium des mines d'uranium naturel jusqu'à l'évacuation définitive des déchets.

**Curie:** activité d'un gramme de radium, équivalant à 37 milliards de becquerels.

**Divergence:** établissement dans le réacteur d'une réaction nucléaire en chaîne.

**Dose létale et dose létale 50:** doses correspondant respectivement à une mortalité de 100 % et de 50 % en dehors de toute thérapeutique médicale.

**Dose absorbée:** quantité d'énergie communiquée par le rayonnement ionisant à la matière par unité de masse. L'unité de mesure est le Gray.

**Dose équivalente:** dose absorbée multipliée par un coefficient tenant compte de la nature du rayonnement (facteur de qualité). L'unité de mesure est le Sievert.

**Electron:** particule élémentaire de charge électrique négative qui gravite autour du noyau, 2000 fois plus légère que le proton, son anti-particule est l'électron positif, ou positron.

**Enrichissement de l'uranium:** procédé par lequel on augmente la concentration de l'isotope 235 de l'uranium.

**Fission:** cassure d'un noyau lourd en deux noyaux plus légers accompagnée d'une libération d'énergie.

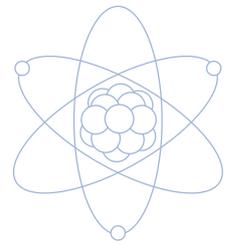
**Fusion:** combinaison de deux noyaux légers accompagnée d'une libération d'énergie.

**Gray:** unité de dose absorbée correspondant à la quantité d'énergie communiquée à la matière par le rayonnement. Un Gy est égal à un Joule par kilo. L'ancienne unité est le RAD (Radiation Absorbed Dose); 1 Gray = 100 RAD.

**HADES:** High Activity Disposal Experimental Site (SCK•CEN), laboratoire sous-terrain à Mol.

**INES:** International Nuclear Event Scale. Echelle internationale des événements nucléaires. Mise au point à la fin des années 80 par un groupe d'experts de l'AIEA et de l'AEN, cette échelle est basée sur un principe équivalent à celui de l'échelle de Richter (utilisée pour évaluer la gravité des tremblements de terre) à une différence fondamentale près: le niveau (parmi sept) ne se mesure pas pendant l'événement mais s'évalue, à posteriori, sur base de différents critères.

**IRE:** Institut national des radioéléments (Fleurus), fondation d'utilité publique.



**Isotope:** élément de même nombre atomique (occupant la même place dans la classification périodique de Mendeleïev) mais de masse atomique différente. En d'autres termes, les atomes des isotopes contiennent le même nombre de protons mais un nombre de neutrons différent.

**Lixiviation:** procédé industriel qui permet de récupérer l'uranium à partir de minerai brut en tas grâce à l'aspersion prolongée d'une solution d'acide sulfurique.

**Masse critique:** quantité minimale de matière fissile nécessaire afin d'obtenir une réaction nucléaire en chaîne.

**Modérateur:** élément qui ralentit les neutrons (nécessaire dans les réacteurs à neutrons dits "thermiques" – pas rapides). Comme modérateurs utilisés, on peut noter le graphite, l'eau légère et l'eau lourde.

**MOX:** mélange d'oxydes ou Mixed Oxyde fuel. Mélange d'oxyde d'uranium et d'oxyde de plutonium qui peut être utilisé comme combustible dans certains réacteurs.

**Neutron:** particule élémentaire électriquement neutre constitutive du noyau.

**Nombre atomique:** nombre de protons dans un noyau d'un atome.

**Nombre de masse:** nombre total de neutrons et de protons contenus dans le noyau d'un atome.

**OCDE:** Organisation de Coopération et de Développement Économiques (Paris).

**ONDRAF:** Organisme National des Déchets RAdioactifs et des matières Fissiles enrichies. Créé en 1980, il est entre autres chargé de mettre au point une solution définitive pour la mise en stockage définitive de l'ensemble des déchets radioactifs en Belgique.

**Demi-vie (ou période):** temps au bout duquel la moitié des noyaux de départ se sont transformés.

**Plutonium:** élément 93 du tableau de Mendeleïev produit par absorption neutronique lors de la fission d'uranium. Le Pu est un transuraniens.

**Proton:** particule élémentaire de charge positive constitutive du noyau.

**PWR:** Pressurised Water Reactor ou réacteur à eau sous pression. Type de réacteur qui équipe près de 60% des centrales nucléaires dans le monde.

**Radioactivité:** propriété que possèdent certains éléments de se transformer par désintégrations successives en un autre élément par la suite de modifications du noyau atomique, en émettant des rayonnements corpusculaires (particules alpha ou bêta) ou électromagnétiques (rayons gamma).

**Radioélément:** élément émetteur de radioactivité

**Radioprotection:** ensemble des règles, des procédures et des moyens de prévention et de surveillance visant à empêcher ou à réduire les effets nocifs des rayonnements ionisants produits sur les personnes ou l'environnement.

**Radon:** élément radioactif naturel produit par la désintégration du radium, du thorium et de l'actinium.

**Rem:** Röntgen Equivalent Man (Röntgen équivalent humain). Ancienne unité remplacée par le Sievert, utilisée pour exprimer la dose équivalente.

**Sievert (Sv):** unité de dose équivalente;  
1 Sievert = 100 REM.

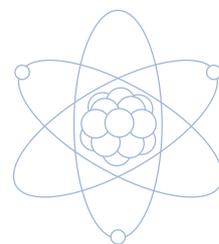
**TEP:** Tomographie par Émission de Positron. Cette technique permet d'obtenir des images en coupes représentant la distribution temporelle, régionale et quantitative d'un traceur radioactif, émetteur de positrons.

**SPECT:** Single Photon Emission Computerized Tomography ou reconstruction d'une image de tranches virtuelles (tomographie) à travers le corps.

**Transuraniens:** éléments chimiques qui dans le tableau périodique forment une série située immédiatement après l'uranium comme le neptunium, le plutonium, l'américium ou le curium.

**Uranium:** élément naturel découvert en 1789 à Joachimsthal, en Bohême, par le chimiste allemand Martin Klaproth. C'est l'élément chimique le plus lourd, abondant à l'état naturel. L'uranium possède quatorze isotopes radioactifs dont les deux plus importants sont respectivement le 238 (99,2745%) et le 235 (0,7200%).

**Zircaloy:** alliage de zirconium avec un ou plusieurs métaux (étain, fer, chrome, nickel), particulièrement résistant mécaniquement et chimiquement.



## CHRONOLOGIE DES ÉVÉNEMENTS QUI ONT MARQUÉ L'HISTOIRE DE L'ATOME

**1789**

Identification de l'uranium par le chimiste allemand Martin Klaproth.

**1895**

8 novembre : découverte de rayons X et premières radiographies par Wilhelm Röntgen.

**1896**

Février : découverte de la radioactivité naturelle par Henri Becquerel.

**1898**

18 juillet : découverte du radium par les époux Curie.

**1905**

Théorie de la relativité par Albert Einstein.

**1909**

Découverte des particules alpha Rutherford.

**1913**

Découverte rayonnement cosmique.

**1922**

15 décembre : les premiers grammes de radium en Belgique sont photographiés à la seule lueur de leur propre rayonnement radioactif.

**1928**

Création de l'ICRP (International Commission for Radiation Protection).

**1934**

Découverte de la radioactivité artificielle par Irène et Frédéric Joliot-Curie.

Découverte du neutron par Shadwick.

**1935**

de Hevery étudie le métabolisme du P-32 dans des rats.

**1938**

Décembre. Otto Hahn et Fritz Strassmann découvrent la fission nucléaire.

**1939**

2 août : Einstein signe la lettre destinée à avertir le président Roosevelt de la menace d'une bombe atomique allemande.

**1942**

- 2 décembre : première réaction en chaîne contrôlée obtenue par l'équipe de Fermi à Chicago.
- Première utilisation thérapeutique de l'Iode 131.

**1945**

- 16 juillet : la première bombe atomique explose à Alamogordo (Etats-Unis).
- 6 août : Little Boy est larguée sur Hiroshima.
- 9 août : Fat Man est larguée sur Nagasaki.

**1949**

- 4 avril : signature du traité instituant l'OTAN.
- 29 août : première bombe A soviétique.

**1946**

Découverte de la résonance magnétique nucléaire par Bloch et Purcell

**1951**

- 20 décembre : première production d'électricité nucléaire réalisée grâce au réacteur américain EBR1 (Experimental Breeder Reactor).
- Première caméra à positrons (Brownell).

**1952**

Création du SCK•CEN.

**1954**

Utilisation clinique de l'échographie.

**1956**

- 11 mai : première réaction en chaîne contrôlée en Belgique avec le BR 1 à Mol.
- 27 août : mise en service de la première centrale nucléaire développant une puissance notable (50 MW) à Calder Hall en Grande-Bretagne.

**1957**

- Premières images scintigraphiques par gamma-camera (Anger).
- 18 décembre : mise en service de la première centrale nucléaire américaine à Shippingport.

**1961**

29 juin : première criticité du BR 2.

**1962**

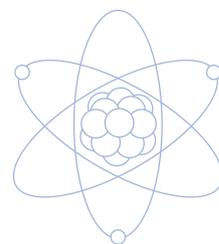
- 29 août : mise en service du BR 3.
- 10 octobre : le BR 3 est raccordé au réseau électrique.

**1963**

Première législation belge (Stallaert, Lafontaine et Alter).

**1966**

Octobre : première divergence de Chooz A.

**1972**

- Premières images CT (Hounsfield).
- Création de l'IRE.

**1973**

Premières images par IRM (Lauterbur).

**1975**

- 15 février: mise en service de Doel 1.
- 1er octobre: mise en service de Tihange 1.
- 1er décembre: mise en service de Doel 2.

**1976-78**

Signature des contrats de retraitement avec la COGEMA (COmpagnie GENérale des MATières nucléaires).

**1979**

28 mars: accident de Three Mile Island.

**1980**

8 août: création de l'ONDRAF.

**1982**

1er octobre: mise en service de Doel 3.

**1983**

1er février: mise en service de Tihange 2.

**1985**

- 1er juillet: mise en service de Doel 4.
- 1er septembre: mise en service de Tihange 3.

**1986**

26 avril: accident de Tchernobyl.

**1988**

Refus de la construction d'une huitième centrale en Belgique (Doel 5).

**1993**

Rapport parlementaire sur la gestion du combustible nucléaire usé. Le gouvernement, sur base des recommandations du parlement, a décrété un moratoire sur la signature de nouveaux contrats de retraitement, a autorisé le recyclage de plutonium (combustible MOX) dans les centrales nucléaires belges et s'est prononcé en faveur d'un examen en profondeur des options de recyclage et non-recyclage (évacuation directe) placées sur un pied d'égalité.

**1994**

- 11 février: la Belgique adopte la convention de Londres qui concerne l'interdiction de l'immersion en mer de déchets radioactifs.
- 26 avril: l'ONDRAF remet au ministre de Affaires économiques une liste de 98 sites à étudier plus en détail dans l'optique d'accueillir éventuellement une installation de stockage en surface de déchets faiblement radioactifs.
- Création de l'AFCN.

**1998**

- Le Gouvernement belge reporte toute décision sur le choix d'une des 2 options (recyclage ou évacuation directe) pour le combustible irradié et demande la poursuite des études en cours.
- Le contrat de recyclage conclu en 1991 (pour l'après 2000) doit être résilié et aucun nouveau contrat ne peut être conclu sans l'accord du Gouvernement.

**1999**

30 septembre: accident de Tokai Mura (Japon).

**De 2000 à 2007**

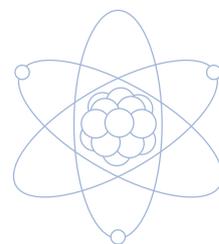
Transports de déchets vitrifiés en provenance d'Areva NC (Cogema-la-Hague, France) vers le site de Belgoprocess les 5/4/00, 17/11/00, 20/02/01, 28/02/02, 25/09/02, 10/09/03, 11/02/04, 16/06/05, 14/09/05, 18/01/06, 27/06/06, 13/09/06, 17/01/07 et 3/4/07.

**2003**

- 31 janvier 2003: loi belge sur la sortie du nucléaire.
- 11 avril: adoption de la loi sur les provisions nucléaires (modifiée par la loi du 25 avril 2007), avec
  - transformation de Synatom en société de provisionnement nucléaire chargée de gérer les provisions de démantèlement des centrales nucléaires et de l'aval du cycle du combustible
  - obligation pour Synatom de placer une partie des provisions nucléaires dans des actifs externes au Groupe SUEZ
  - mise en place d'une commission de contrôle: la Commission des Provisions Nucléaires composée majoritairement de représentants de l'Etat.

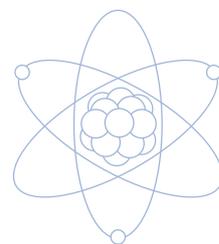
**2006**

23 juin 2006: décision du Gouvernement belge de retenir le site de Dessel pour le dépôt final des déchets de catégorie A.



## LISTE D'ADRESSES UTILES

Société	Observations
<p><b>Agence Fédérale de Contrôle Nucléaire</b> Rue Ravenstein 36 1000 Bruxelles T: 02/289 21 01 F: 02/289 21 03 www.fanc.fgov.be</p>	<p>Etablissement public dont la mission est de veiller à ce que la population et l'environnement soient protégés d'une manière efficace contre le danger des radiations ionisantes. L'Agence participe aux travaux des organisations internationales (telles que la Commission européenne et l'AIEA). L'Agence assure la gestion du réseau "Télérad" (surveillance radiologique du territoire belge).</p>
<p><b>AIB-VINCOTTE CONTROLATOM</b> Business Class Kantorenpark Jan Olieslagerslaan 35 1800 Vilvoorde T: 02/674 51 20 F: 02/674 51 40 www.controlatom.be</p>	<p>Organisme membre du Groupe Vinçotte, agréé pour effectuer le contrôle permanent des grandes installations nucléaires dont FBFC et l'IRMM et plus de 3000 établissements de Classe II et III.</p>
<p><b>BEL V</b> Rue Walcourt 148 1070 Bruxelles T: 02/528 01 11 F: 02/536 85 85 www.belv.be</p>	<p>Organisme belge agréé pour effectuer le contrôle permanent des grandes installations nucléaires, dont les centrales nucléaires, le CEN•SCK, Belgonucleaire, Belgoproprocess et l'IRE.</p>
<p><b>BELGOPROCESS</b> Gravenstraat 73 2480 Dessel T: 014/33 40 00 www.belgoproprocess.be</p>	<p>Société Anonyme, filiale à 100% de l'ONDRAF. Chargée du traitement et du conditionnement de tous les déchets radioactifs produits en Belgique qui ne sont pas traités directement par les producteurs et assure l'entreposage intermédiaire des déchets conditionnés avant leur mise en dépôt final.</p>
<p><b>BELGIAN NUCLEAR SOCIETY (BNS)</b> Avenue Hermann Debroux 40 1160 Bruxelles www.bnsorg.be</p>	<p>L'Association a pour objet principal l'avancement de la science et de l'ingénierie relatives aux applications pacifiques de l'énergie nucléaire, et de toutes les sciences qui y sont liées.</p>
<p><b>ELECTRABEL</b> Boulevard du Régent 8 1000 Bruxelles T: 02/518 61 11 F: 02/518 64 00 www.electrabel.com</p>	<p>Electrabel GDF SUEZ vend de l'électricité, du gaz naturel et des produits et services liés à l'énergie. C'est le premier énergéticien du Benelux. Elle est active dans le trading d'électricité et de gaz naturel sur tous les marchés énergétiques en Europe.</p>
<p><b>FORATOM</b> Rue Belliard, 65 1040 Bruxelles T: 02/502 45 95 F: 02/502 39 02 www.foratom.org</p>	<p>Association professionnelle de l'industrie nucléaire européenne. Publie régulièrement des informations sur le nucléaire diffusées dans toute l'Europe.</p>



<p><b>FORUM NUCLÉAIRE BELGE</b> Gulledelle 96 1200 Bruxelles T : 02/761 94 50 F : 02/761 94 59 www.nuclearforum.be</p>	<p>L'association des sociétés et organismes actifs dans le domaine des applications pacifiques de la science et de la technologie nucléaire. Le Forum nucléaire informe tant le monde politique que la presse et le grand public.</p>
<p><b>IRE</b> Avenue de l'Espérance, 1 6220 Fleurus T: 071 82 95 56 www.ire.eu</p>	<p>L'IRE est une fondation d'utilité publique active dans les domaines de la santé publique et de l'environnement. C'est un important producteur mondial de radioéléments utilisés en médecine nucléaire à des fins de diagnostic et de thérapie. L'IRE met aussi en œuvre des technologies de surveillance et de mesure du taux de radioactivité dans le sol, l'air et l'eau.</p>
<p><b>ONDRAF</b> Avenue des Arts, 14 1210 Bruxelles T : 02/212 10 11 F : 02/218 51 65 www.ondraf.be</p>	<p>Est responsable de la gestion de tous les déchets radioactifs présents sur le territoire belge. L'organisme a pour tâche de mettre au point une gestion cohérente et sûre de ces déchets, laquelle comprend les aspects suivants : l'inventaire, l'enlèvement et le transport, le traitement, l'entreposage provisoire, la gestion à long terme, ainsi que des missions de démantèlement et de gestion des matières fissiles enrichies. L'ONDRAF remplit ses missions sous l'oeil attentif de son autorité de tutelle, le Ministre chargé de l'Energie.</p>
<p><b>SCK•CEN</b> Av. Herrmann Debroux 40 1160 Bruxelles T : +32 2 661 19 51 www.sckcen.be</p>	<p>Le SCK•CEN est un institut de recherche d'utilité publique qui - dans une perspective de développement durable et un cadre international - participe à la sûreté nucléaire et à la radioprotection, aux applications médicales et industrielles des radiations et à la gestion du cycle complet du combustible à travers ses activités de recherche &amp; développement, de formation, de communication et de prestations de service.</p>
<p><b>SYNATOM</b> Avenue Ariane 7 1200 Bruxelles T : 02/505 07 11 F : 02/505 07 90 www.synatom.com</p>	<p>Synatom est une filiale à 100% d'Electrabel GDF SUEZ. L'entreprise est chargée de l'approvisionnement en combustible des centrales nucléaires belges, de gérer les combustibles usés et de constituer les provisions nucléaires.</p>