

L' ÉNERGIE POUR LE FUTUR
L'option nucléaire

Une prise de position de la Société Européenne de Physique

L'énergie pour le futur - L'option nucléaire

La position de l'EPS

La Société Européenne de Physique (EPS) est un organisme indépendant, financé par des sociétés nationales de physique, d'autres organismes et des membres individuels. Elle représente plus de 100 000 physiciens et peut s'appuyer sur des experts dans tous les domaines liés à la physique.

Cette déclaration de position comprend deux parties : la position de l'EPS, qui résume ses recommandations, et une partie scientifique et technique. La partie scientifique et technique est essentielle à la déclaration puisqu'elle contient tous les faits et arguments sur lesquels se fonde la position de l'EPS.

(i) Objectif de la déclaration de position (préambule)

L'utilisation de l'énergie nucléaire pour la production d'électricité fait l'objet d'un débat mondial : certains pays en augmentent fortement l'exploitation, d'autres l'abandonnent progressivement, d'autres encore édictent des lois pour l'interdire. Cette déclaration de position vise à présenter de façon impartiale les avantages et les inconvénients de l'énergie nucléaire et à informer tant les décideurs que le public par l'exposé de faits vérifiables. Il a pour but de contribuer à un débat démocratique qui prenne en compte aussi bien les faits scientifiques et techniques que les inquiétudes légitimes des populations

(ii) Consommation future d'énergie et production d'électricité (Section 1)

L'accroissement de la population mondiale - de 6,5 milliards d'individus actuellement à 8,7 milliards estimés en 2050 - s'accompagnera d'une augmentation de la demande en énergie de 1,7 % par an. Aucune source ne sera en mesure, à elle seule, d'assurer les besoins en énergie des générations futures. En Europe, environ un tiers de l'énergie produite est de l'électricité, dont 31 % est fournie par des centrales nucléaires et 14,7 % par des sources d'énergie renouvelable. Bien que la contribution des sources d'énergie renouvelable ait augmenté significativement depuis le début des années 1990, la demande en électricité ne peut pas être satisfaite de manière réaliste sans la contribution nucléaire.

(iii) Nécessité d'un cycle de production d'énergie sans émission de CO₂ (Section 1)

L'émission anthropique de gaz à effet de serre, parmi lesquels le dioxyde de carbone est le principal contributeur, a amplifié l'effet de serre naturel et a conduit au réchauffement climatique. La contribution la plus importante est liée à la combustion de ressources fossiles. Une augmentation

supplémentaire aura des effets décisifs sur la vie sur terre. La mise en œuvre d'un cycle énergétique avec des émissions de CO₂ aussi faibles que possible doit être réalisée partout où c'est possible pour lutter contre le changement climatique. Les centrales nucléaires produisent de l'électricité sans émission de CO₂.

(iv) La production d'énergie nucléaire, aujourd'hui (Section 2)

Dans le monde, 435 centrales nucléaires produisent aujourd'hui 16 % de l'électricité mondiale. Elles assurent de manière fiable la fourniture d'électricité en base et en pointe. L'accident de Tchernobyl a provoqué d'amples discussions sur la sûreté des centrales nucléaires, et a suscité des inquiétudes sérieuses. La production nucléaire de l'Europe augmentera vraisemblablement peu dans le futur proche, alors qu'un important développement est prévu en Chine, aux Indes, au Japon et en République de Corée.

(v) Sujets d'inquiétude (Sections 3 et 4)

Comme toute source d'énergie, la production d'énergie nucléaire n'est pas exempte de risques. La sûreté des centrales nucléaires, la gestion des déchets, les risques de prolifération et les menaces de mouvements extrémistes, sont l'objet de sérieuses inquiétudes. Le point jusqu'où les risques associés sont acceptables est une question de jugement qui doit aussi prendre en compte les risques spécifiques liés aux sources alternatives d'énergie. Ce jugement doit être établi de manière rationnelle à partir d'éléments techniques, de constats scientifiques, de discussions ouvertes des données, et en relation avec les risques associés aux autres sources d'énergie.

(vi) La production d'énergie nucléaire dans le futur (Section 5)

En réponse au souci de sécurité, une nouvelle génération de réacteurs a été développée (Génération III) qui inclut une technologie de sécurité avancée et une prévention améliorée des accidents telle que, même dans le cas très peu vraisemblable où se produirait une fusion du cœur, tout la matière radioactive resterait séquestrée à l'intérieur de la cuve de retenue.

En 2002, un groupe de travail international a présenté les concepts de réacteurs de Génération IV, intrinsèquement sûrs. Ils offrent, de plus, une meilleure économie pour la production d'électricité, génèrent une quantité réduite de déchets à stocker, et rendent la prolifération plus difficile. Quoiqu'un effort de recherche soit encore nécessaire, certains de ces réacteurs pourraient être opérationnel dès 2030.

Des systèmes pilotés par accélérateur (ADS), appelés aussi réacteurs hybrides, permettraient de réaliser la transmutation du plutonium et des actinides mineurs dont la présence constitue

actuellement l'essentiel de la radioactivité à long terme des réacteurs à fission. Les ADS pourraient contribuer significativement à la production d'énergie à grande échelle au-delà de 2020.

Les réacteurs à fusion produisent de l'énergie sans CO₂ par la fusion de deutérium et tritium. Contrairement aux réacteurs à fission, ils ne produisent pratiquement pas de déchets à longue durée de vie. Cette option prometteuse pourrait être disponible au cours de la seconde moitié de ce siècle.

(vii) L'avis de l'EPS (Section 6)

Étant donné les problèmes d'environnement auxquels notre planète est actuellement confrontée, nous nous devons, à nous-mêmes et aux générations futures, de ne pas renoncer à une technologie dont l'aptitude à fournir de l'électricité de façon fiable et sûre sans émissions de CO₂ n'est plus à prouver. L'énergie nucléaire peut et devrait apporter une importante contribution à l'ensemble des sources à faible émission de CO₂. Cela ne sera possible que si l'appui des populations est obtenu, via un débat ouvert et démocratique qui respecte les inquiétudes des citoyens et s'appuie sur des faits scientifiques et techniques vérifiables.

Parce que certains pays européens s'opposent à la production d'électricité par l'énergie nucléaire, et que seul un petit nombre d'entre eux soutiennent la recherche pour la fusion nucléaire, le nombre d'étudiants dans ce domaine décroît, de même que le nombre de personnes compétentes en sciences nucléaires. Il y a un réel besoin de formation en science nucléaire et de préservation de la connaissance dans ce domaine. Besoin aussi de recherche à long terme, tant en fission qu'en fusion nucléaire, ainsi que sur les méthodes d'incinération, de transmutation et de stockage des déchets.

L'Europe doit rester au niveau des évolutions dans la conception de réacteurs, indépendamment de toute décision concernant leur construction en Europe. C'est une raison supplémentaire pour investir en RD&D dans les réacteurs nucléaires, et c'est essentiel si l'Europe veut être capable de suivre les programmes des pays en voie de développement rapide, comme la Chine et l'Inde qui sont décidés à construire des centrales nucléaires, et contribuer à en assurer la sûreté, par exemple au travers d'une participation active à l'AIEA.

Le Comité Exécutif de l'EPS
Novembre 2007

L'ÉNERGIE POUR LE FUTUR

L'option nucléaire - Partie Scientifique et Technique

Préambule

La Société Européenne de Physique a la responsabilité de faire connaître sa position dans les domaines où la physique joue un rôle important, et qui ont une portée générale pour la société. L'énoncé qui suit sur *l'Option Nucléaire* et son rôle dans le futur pour la production d'électricité à grande échelle en économie durable et sans émission de CO₂, est motivé par le fait que nombreux sont les pays européens fortement développés qui négligent l'option nucléaire dans leur politique énergétique à long terme. Le changement climatique, l'accroissement de la population mondiale, les ressources limitées de notre planète, la très forte croissance économique des pays d'Amérique Latine et d'Asie, et l'aspiration légitime des pays en voie de développement d'atteindre un niveau de vie raisonnable, sont autant de facteurs qui pointent, sans échappatoire possible, la nécessité de recourir à des sources d'énergie durables.

Les auteurs de ce rapport sont membres du Comité de Physique Nucléaire (NPB) de l'EPS. Ils travaillent dans le domaine des études nucléaires fondamentales, mais ne sont aucunement impliqués dans l'industrie de l'énergie nucléaire. Ce rapport présente notre perception des avantages et des inconvénients de l'énergie nucléaire comme source durable, susceptible de répondre à nos besoins énergétiques à long terme. Nous appelons à revenir sur les décisions d'arrêt progressif de centrales nucléaires qui fonctionnent de manière sûre et efficace et nous insistons sur la nécessaire recherche future sur l'option nucléaire, en particulier les réacteurs de Génération IV qui promettent une avancée significative en termes de sûreté, de recyclage du combustible, de l'incinération et la mise au rebut des déchets radioactifs. Nous soulignons la nécessité de préserver la connaissance dans le domaine nucléaire, par l'enseignement et la recherche dans les Universités et Instituts Européens.

- Hartwig Freiesleben (Président du NPB : Comité de Physique Nucléaire de l'EPS), Université Technique de Dresde, Allemagne
- Ronald C. Johnson, Université du Surrey, Guilford, Royaume-Uni,
- Olaf Scholten, Institut de Physique Nucléaire, Groningen, Pays-Bas
- Andreas Türler, Université Technique, Munich, Allemagne
- Ramon Wyss, Institut Royal de Technologie, Stockholm, Suède

Novembre 2007

Société Européenne de Physique
(The European Physical Society)
6 rue des Frères Lumière
68060 Mulhouse cedex, France

1. Le besoin d'une fourniture durable d'énergie sans émission de CO₂

L'accès à l'énergie pour tout un chacun est un pré-requis nécessaire au bien-être de l'humanité, à la paix mondiale, à la justice sociale et à la prospérité économique. Cependant, l'Homme ne dispose que d'un monde et doit à la génération suivante de lui laisser un monde viable. C'est ce qu'exprime le terme « durable » qui est défini dans le rapport Brundtland de 1987 [1]. « *Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs*¹. » Cet impératif éthique exige que toute discussion sur l'énergie future englobe les aspects à court et à long terme de chacune des sources d'énergie, tels que disponibilité, sûreté et impact environnemental. En ce qui concerne ce dernier, la production de déchets et les risques associés, sont un souci majeur, qu'il s'agisse de CO₂ dû à la combustion de ressources fossiles, ou de déchets radioactifs dus à la consommation de combustible nucléaire, pour ne citer que ces deux là. Les paragraphes suivants font le bilan des sources principales d'énergie primaire et de la production d'électricité dans l' Europe actuelle, et abordent la question des émissions de CO₂. Egalement envisagée, la question de la consommation future d'énergie sur le plan mondial.

Sources d'énergie primaire de grande échelle

En 2004, la production totale d'énergie primaire des 25 pays européens a été de 0,88 milliards de tonnes en équivalent pétrole, soit 10,2 PWh (1PWh = 1 Petawatt heure = 1 milliard de MWh) [2]. Cette énergie a été fournie par un ensemble de sources d'énergie primaire à grande échelle (nucléaire :28,9% - gaz naturel : 21,8% - charbon ou lignite : 21,6% - pétrole brut : 15,3%) et leurs produits dérivés (coke, fuel, essence) et, à plus petite échelle, par des sources d'énergie renouvelable (biomasse et déchets : 8,2% - hydroélectricité : 3,0% - géothermie : 0,6% - éolien : 0,6% - soit un total de 12,4%) Les sources primaires satisfont les besoins concentrés en énergie de l'industrie, de l'agriculture, de l'habitat et des transports. D'autre part, le pétrole et le gaz peuvent être utilisés en tant que sources distribuées et ils ont la souplesse nécessaire à la production d'énergie à petite échelle nécessaire, par exemple, dans le secteur des transports. Il ressort des nombres cités ci-dessus que l'énergie nucléaire fournit actuellement une part importante de l'énergie totale.

Environ 58,7% de la production totale d'énergie provient de la combustion de produits fossiles (charbon, lignite, pétrole brut, gaz naturel) et s'accompagne d'une émission de CO₂

¹ NdT : version française du passage sur Wikipedia : http://fr.wikisource.org/wiki/Rapport_Brundtland

responsable pour 75% de l'effet de serre d'origine anthropique. Les autres contributions importantes sont dues au méthane (CH₄, 13%), à l'oxyde nitreux (N₂O, 6%) et aux chlorofluorocarbones (5%) [2]. Afin de combattre l'effet de serre, il faudrait minimiser l'utilisation des produits fossiles, ou bien réduire drastiquement leur production nette de dioxyde de carbone partout où on le peut. Le principal potentiel de réduction des émissions de CO₂ se trouve dans la production d'électricité, dans le secteur des transports et dans la consommation économe, par exemple par les économies d'énergie.

Production d'électricité et émissions de CO₂

La production totale d'électricité des 25 pays de l'UE qui est de 3,2 PWh, correspond à 32,3 % de l'énergie totale produite par les 25 pays de l'UE en 2004. Les sources sont détaillées dans la figure 1. Environ 31,0 % de cette énergie électrique provenait de centrales nucléaires, 10,6 % de centrales hydrauliques, 2,1 % de centrales à flamme alimentées en biomasse, 1,8 % d'éoliennes, 1,5 % d'autres sources parmi lesquelles la géothermie contribue à 0,2 %. La contribution photovoltaïque était négligeable. Aucune de ces sources n'émettent de CO₂ en fonctionnement. Au contraire, les centrales à flamme alimentées en gaz, pétrole et charbon émettent du CO₂; l'ensemble de celles-ci contribuent pour 52,9 % à la production d'électricité.

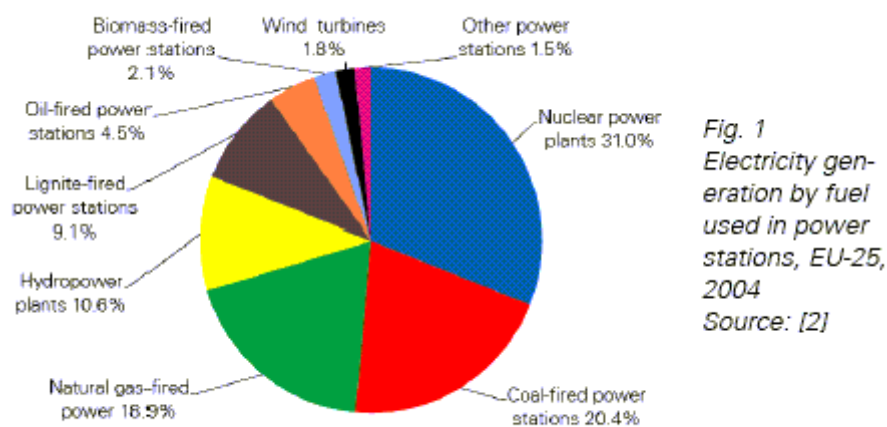


Figure 1 : Part des sources d'énergie dans la production électrique - UE-25, 2004 [2]

Il est clair, avec ces nombres, que les centrales nucléaires représentent un soutien majeur pour la fourniture électrique de l'Europe ; elles fournissent à grande échelle la production en base et, sur demande, en pointe. Réduire leur contribution à la production électrique provoquera un manque sérieux d'électricité en Europe.

Toutes les sources d'électricité exigent la construction d'usines dédiées et leur alimentation en combustible. Ces activités entraînent extraction, traitement, conversion, transport, qui contribuent elles-mêmes aux émissions de CO₂. Ensemble, elles forment le cycle du combustible amont. Il y a aussi un aval du cycle du combustible. Dans le cas des centrales nucléaires, celui-ci comprend le traitement et le stockage du combustible usé et, dans le cas des centrales à flamme alimentées en pétrole ou charbon, le captage du dioxyde de soufre (SO₂), du carbone non consommé, et dans le cas idéal, le stockage du CO₂ [3] pour en éviter le relâchement à l'atmosphère. Cependant, cette technologie demande une importante recherche car les effets à long terme du stockage de CO₂ ne sont pas actuellement connus. Le démantèlement d'une centrale fait également partie de l'aval du cycle. L'amont et l'aval du cycle impliquent tout deux inévitablement des émissions de CO₂. Les avantages ou les inconvénients de chaque mode de production d'électricité ne peuvent être discutés de façon réaliste qu'à la condition d'en évaluer le cycle de vie complet.

La quantité de CO₂ émise pour produire 1 kWh d'électricité, parfois donnée sous le nom d'empreinte carbone, peut être calculée comme un sous-produit d'analyses de cycle de vie [4]. Les résultats dépendent de la centrale considérée et donnent des valeurs dispersées, dispersion rendue ici (figure 2) par des couples de barres pour chaque combustible.

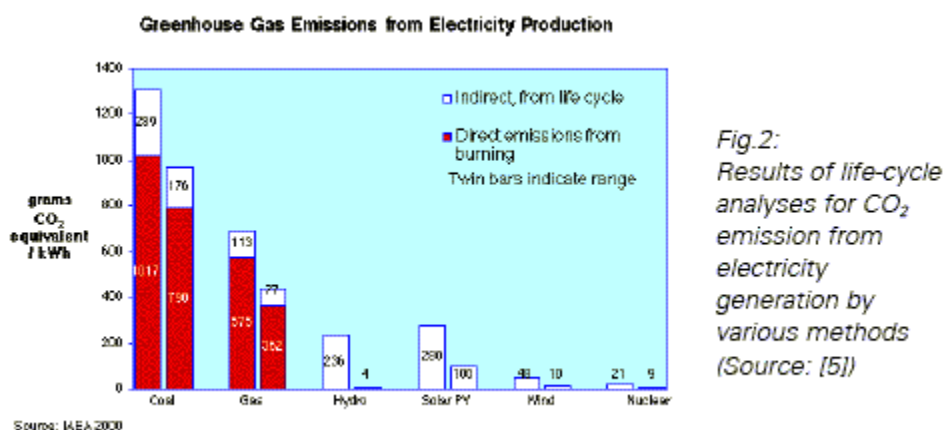


Figure 2 : Calcul d'émissions de CO₂ pour diverses méthodes de production d'électricité à partir d'analyses de cycle de vie [5].

D'autres études utilisent d'autres pondérations et arrivent à des valeurs légèrement différentes. Le « Modèle d'émissions globales pour des systèmes intégrés » de l'institut allemand Öko-Institut [6] donne les valeurs suivantes pour les émissions de CO₂ en grammes par kWh : charbon (à peu près 1000), cycle combiné gaz (à peu près 400), nucléaire (35), hydroélectricité (33), éolien (20) (cité par [7]). Ces valeurs reflètent vraisemblablement la situation allemande et peuvent

ne pas correspondre à celles d'autres pays [8]. Par exemple, la France produit 79 % de son électricité à partir d'énergie nucléaire (l'Allemagne 31 %) et a par conséquent des émissions de CO₂ inférieures à celles de l'Allemagne. Même si on adopte les valeurs de la référence [4], une centrale à flamme au charbon émet encore 29 à 37 fois plus de CO₂ qu'une centrale nucléaire. Cela signifie que la production nucléaire (31 % de 3,2 PWh) évite l'émission de 990 à 1270 millions de tonnes de CO₂ tous les ans alors que les énergies renouvelables prises dans leur ensemble (14,7 % de 3,2 PWh) n'en économisent que moins de moitié autant. L'économie faite par le nucléaire est supérieure au 704 millions de tonnes de CO₂ émises par l'ensemble du parc automobile européen chaque année (4,4 Tkm/an [2], 1 Tkm = 1 Terakilomètre = 1 milliard de milliards de km ; 160 g/km [9]). Remplacer la production d'électricité nucléaire en Europe par une production à partir des combustibles fossiles équivaldrait à plus que doubler les émissions du parc automobile européen. Les émissions mondiales de CO₂, soit environ 28 milliards de tonnes [3], augmenteraient de 2,6 à 3,5 milliards de tonnes par an si le combustible nucléaire devait être remplacé par du combustible fossile.

Ces exemples d'analyse en cycle de vie montrent sans ambiguïté que la contribution de l'électricité nucléaire aux émissions de gaz à effet de serre est négligeable, et ce résultat est indépendant de l'attitude envers l'énergie nucléaire que peut avoir l'institution qui a réalisé l'analyse.

Le changement climatique

Depuis le début de l'ère industrielle, la terre a connu une augmentation de la température moyenne presque certainement due à l'amplification d'origine humaine de l'effet de serre naturel par l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre [10]. Les signes de cette augmentation de température incluent la fonte à un rythme accéléré des glaciers (Fig. 3), des zones de permafrost et de la calotte glaciaire arctique.

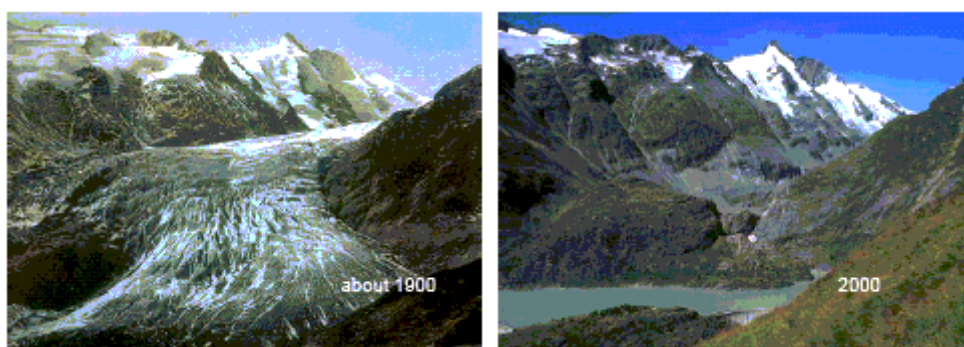
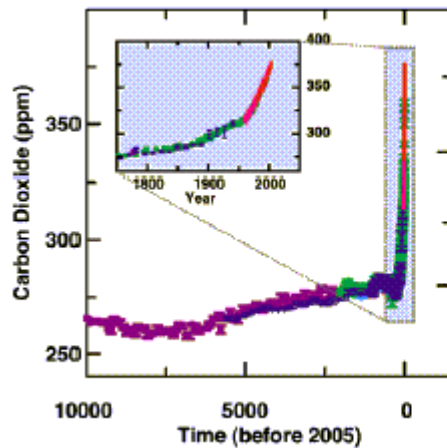


Figure 3 : Glacier Pasterze avec Grossglockner (3798m) [11]

Sur la même période, la concentration dans l'atmosphère de gaz à effet de serre d'origine anthropique, parmi lesquels le dioxyde de carbone (CO₂) est le plus gros contributeur, a augmenté jusqu'à un niveau jamais observé depuis plusieurs centaines de milliers d'années ; l'évolution de la concentration de CO₂ au cours des derniers 10 000 ans est montrée figure 4. Les scientifiques s'accordent à penser qu'une augmentation supplémentaire de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère aura des effets dommageables pour la vie sur terre [10,12]. Ainsi, l'accroissement des émissions de gaz à effet de serre, dû principalement de la combustion de ressources fossiles, doit être contrôlé, comme il en a été convenu dans le protocole de Kyoto [13].



*Fig. 4:
CO₂ concentration (parts
per million, ppm) in the
atmosphere during the last
10,000 years; inset panel:
since 1750 (Source: [10])*

Figure 4 : Concentration de CO₂ (parties par million) dans l'atmosphère au cours des derniers 10 000 ans; en encadré, depuis 1750 [10].

Sources d'énergie primaire au plan mondial

Des scénarios relatifs aux sources d'énergie primaire futures au plan mondial (autres que les sources d'électricité) ont fait l'objet de nombreuses études détaillées. Le scénario de développement durable de l'étude AIE/OCDE [14] prédit, en Gtep (1 Gtep = 1 gigatonne d'équivalent pétrole = 11,63 MWh), la progression de la figure 5 avec une augmentation de la population mondiale de 6,5 milliard aujourd'hui à 8,7 milliards en 2050. Afin de satisfaire la demande d'énergie accrue, toutes les sources disponibles aujourd'hui devront augmenter leur contribution. Après 2030, lorsque la contribution à l'énergie primaire des combustibles fossiles commencera à décliner, comme le montre la figure 5, le nucléaire, la biomasse et d'autres sources d'énergie renouvelable (hydroélectricité, éolien, géothermie) devront être exploitées de manière croissante. D'après le rapport de l'AIE « World Energy Outlook, 2004 » [16] à la fois la demande d'énergie et les émissions de CO₂ liées à l'énergie vont augmenter, jusqu'à 2030, à un taux annuel d'environ 1,7 %.

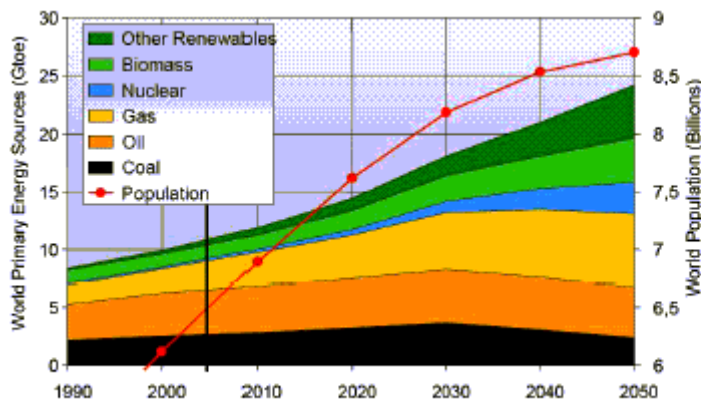


Fig.5: Scenario of world primary energy sources for a sustainable future (Source: [14], see also [15].) Note the suppressed zero point of the population scale.

Figure 5: Scénario de sources d'énergie primaires mondiales [14] - voir aussi [15] ; Remarquer l'échelle de population mondiale et son minimum non nul.

Il convient de rappeler que la principale source d'électricité renouvelable est l'hydroélectricité (voir figure 1) ; sa contribution ne peut pas être augmentée de manière significative en Europe dans un avenir prévisible [17] ; il en est de même pour l'électricité d'origine géothermique [17]. Des fermes éoliennes pour la génération d'électricité ont été construites en grand nombre en Europe depuis 1990 ; cependant, on voit mal comment la production d'électricité éolienne remplacera la production par le gaz, le pétrole et le charbon (52,9 % au total) ou par le nucléaire (31,0 %) dans un avenir proche ; l'accroissement annuel n'est pas, loin s'en faut, suffisant, comme on peut le constater figure 5. Ainsi, toutes les sources possibles doivent être exploitées afin de faire face à la demande grandissante d'énergie.

Le récent projet ambitieux de l'UE de réduire les émissions de CO₂ de 20 % en 2020 par rapport au niveau de 1990 [18] compte sur une réduction importante des émissions de CO₂ dues au secteur des transports mais aussi, implicitement, sur un taux de croissance beaucoup plus rapide du photovoltaïque et des fermes éoliennes que par le passé. Cependant, la production d'électricité, par exemple, par des éoliennes, devrait être multipliée par 17 pour atteindre le niveau de production électronucléaire. On voit difficilement comment cette augmentation pourra être atteinte dès 2020. Et ce calcul n'inclut pas la croissance attendue de la demande d'énergie de 1,7 % par an. De plus, il faut des dispositifs de stockage de l'énergie afin d'assurer une fourniture indépendante du temps qu'il fait ; ceux-ci ne sont pas encore disponibles. Ainsi, l'objectif du complet remplacement de l'électricité nucléaire par des sources renouvelables est discutable, voire irréaliste (voir aussi [12]). Ainsi, la réalisation du plan de réduction du CO₂ de l'UE dépend fortement de la disponibilité d'électricité produite par les centrales nucléaires.

Substituer aux centrales nucléaires des centrales à flamme alimentées au charbon n'est pas possible puisque cela augmenterait significativement les émissions mondiales de CO₂. Les renouvelables n'augmenteront pas assez vite pour remplacer l'électricité nucléaire dans un avenir proche. Afin de satisfaire la demande croissante d'électricité, l'objectif de réduction du CO₂ récemment décidé par l'UE, et pour éviter un changement climatique potentiellement désastreux, l'alternative n'est pas nucléaire *ou* renouvelables mais bien nucléaire *et* renouvelables.

2 La production électronucléaire aujourd'hui

L'énergie nucléaire est déjà employée pour la génération d'électricité à grande échelle, elle repose actuellement sur la fission de l'uranium-235 (^{235}U) et du plutonium-239 (^{239}Pu) dans les centrales. Elle représente environ 5 % de la production totale d'énergie au plan mondial et fournit environ 16 % (2,67 PWh) de l'électricité mondiale [19] ; elle évite l'émission annuelle de 2,6 à 3,5 milliards de tonnes de CO_2 . Avec les nouvelles solutions formulées ci-dessous, l'énergie nucléaire pourra continuer à représenter une source d'énergie importante sur le long terme, avec des usines qui incinèrent les déchets nucléaires tout en produisant de l'énergie, et avec des concepts de réacteurs intrinsèquement sûrs. Aujourd'hui (31 mai 2007) 435 réacteurs nucléaires sont en fonctionnement dans le monde, il y en a 196 en Europe [19]. 37 nouvelles centrales sont en cours de construction, la plupart dans des pays d'Europe de l'Est ou d'Asie, elles fourniront 32 GW en puissance.

	Production Electronucléaire 2006		Réacteurs en fonctionnement Mai 2007		Réacteurs en construction Mai 2007		Réacteurs planifiés Mai 2007	
	TWh	% e	Nbr	MWe	Nbr	MWe	Nbr	MWe
Belgique	44,3	54	7	5728	0	0	0	0
Bulgarie	18,1	44	2	1906	0	0	2	1900
Rep. Tchèque	24,5	31	6	3472	0	0	0	0
Finlande	22,0	28	4	2696	1	1600	0	0
France	428,7	78	59	63473	0	0	1	1630
Allemagne	158,7	32	17	20303	0	0	0	0
Hongrie	12,5	38	4	1773	0	0	0	0
Lituanie	8,0	69	1	1185	0	0	0	0
Pays-Bas	3,3	3,5	1	485	0	0	0	0
Roumanie	5,2	9,0	1	655	1	655	0	0
Russie	144,3	16	31	21743	3	2650	8	9600
Slovaquie	16,6	57	5	2064	0	0	2	840
Slovénie	5,3	40	1	696	0	0	0	0
Espagne	57,4	20	8	7442	0	0	0	0
Suède	65,1	48	10	8975	0	0	0	0
Suisse	26,4	37	5	3220	0	0	0	0
Ukraine	84,8	48	15	13168	0	0	2	1900
Royaume Uni	69,2	18	19	10982	0	0	0	0
Europe	1194,4	35,4	196	169996	5	4905	15	15870

Tableau 1 : Réacteurs nucléaires européens [19]

La liste, pour l'Europe, des réacteurs nucléaires connectés au réseau, en construction ou prévus est donnée dans le tableau 1 (la lettre « e » indique la puissance électrique).

Cette capacité de production restera probablement inchangée dans un avenir proche, avec quelques mises à niveau (surtout dans les pays d'Europe de l'Est) et des prolongations de durée de vie. Quelques pays (la Belgique, l'Allemagne, les Pays-bas, la Suède) envisagent une sortie

progressive de l'énergie nucléaire alors que dans d'autres (l' Autriche, le Danemark, la Grèce, l' Irlande, l' Italie, et la Norvège) l'usage de l'énergie nucléaire est interdit par la loi. La situation en Extrême Orient, en Asie du Sud et au Moyen Orient est assez différente : 90 réacteurs sont en fonctionnement et une extension importante est prévue, surtout en Chine, en Inde, au Japon, et en République de Corée [19].

Les centrales nucléaires fournissent 16 % de l'électricité mondiale ; elles représentent un soutien majeur pour la fourniture électrique de l' Europe dont elles produisent 31 %. Un petit nombre de nouvelles centrales sont en construction en Europe, alors qu'une extension importante de la production nucléaire d'électricité est prévue en Asie du Sud et en Extrême Orient.

3. Sujets d'inquiétude

Les risques et la sécurité

Notre vie quotidienne implique des dangers qui sont tous associés à certains risques. Il en est ainsi pour la production d'énergie. Puisque l'humanité dépend de l'énergie, il y a lieu d'évaluer les risques inhérents aux différentes sources d'énergie afin de pouvoir juger de leurs mérites. Les scientifiques ont développé des outils permettant de quantifier le niveau de danger.

Par exemple, une analyse-risque comparative a été réalisée par le Paul-Scherrer-Institute à Villigen, Suisse [20], centrée sur les accidents graves liés à l'énergie qui ont eu lieu dans les années 1969-2000. Un des résultats de cette analyse est représenté figure 6 avec le nombre de décès immédiats par Gigawatt (électrique) an (remarquer que l'échelle verticale n'est pas linéaire).

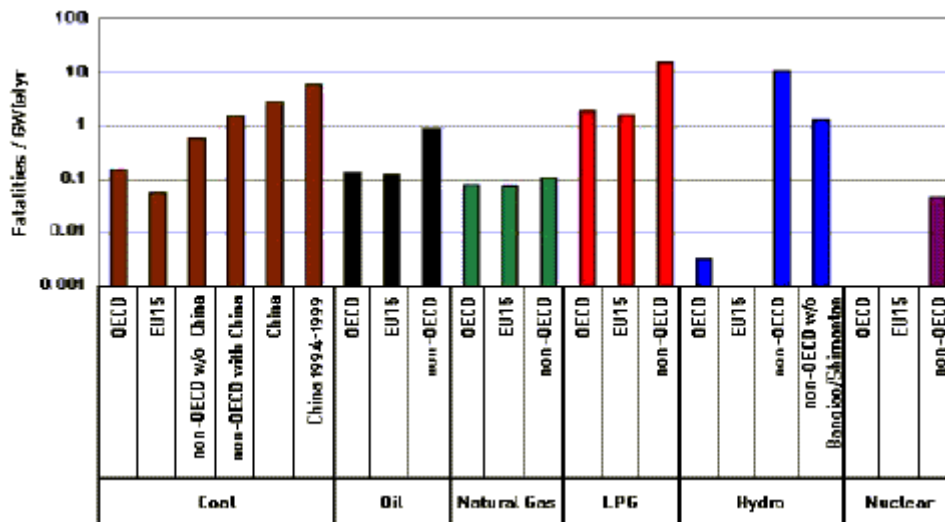


Figure 6 : Comparaison agrégée et normalisée des taux de mortalité liés à l'industrie de l'énergie, basée sur l'historique d'accidents graves qui ont eu lieu dans des pays de l'OCDE, hors OCDE, et UE-15 au cours des années 1969-2000, sauf les données du livre annuel chinois de l'industrie charbonnière où les données ne sont disponibles que pour les années 1994-1999. Pour l'hydroélectricité, les valeurs hors OCDE sont données avec et sans le plus gros accident de tous les temps qui a eu lieu en Chine et causa à lui seul 26 000 morts. Aucune redistribution des dommages entre les pays de l'OCDE et hors OCDE n'a été utilisée dans ce cas. Noter que seules les morts immédiates sont comptabilisées ici (d'après [20]). LPG : *Liquefied petroleum gas* – gaz de pétrole liquéfié.

On constate que les centrales nucléaires sont les moins susceptibles de provoquer des décès immédiats. Dans le cas de l'accident de Tchernobyl, cependant, les conséquences à long terme doivent être prises en compte. C'est ce qu'a fait le groupe d'étude de l'OMS en 2005 [21] qui a énuméré 50 décès immédiats radio-induits parmi les membres des équipes de sauvetage et neuf décès d'enfants atteints d'un cancer de la thyroïde. La question du nombre total de décès qui

peuvent être attribués à l'accident de Tchernobyl, ou que l'on peut attendre à l'avenir est complexe et est également traitée en détail dans le rapport de l'OMS [21]. Un résultat clair de ce rapport est que « la pauvreté, les maladies liées au mode de vie qui se généralisent dans l'ex-Union soviétique, et les troubles mentaux constituent, pour les populations locales, une menace beaucoup plus grave que l'exposition aux radiations ionisantes. » [21]

Autant il est possible d'examiner les accidents passés, autant il est difficile d'évaluer l'impact potentiel d'accidents qui pourraient se produire à l'avenir. Une telle évaluation des risques a été réalisée par B.L. Cohen qui, pour pouvoir quantifier le risque, a introduit une grandeur qu'il a appelée la « perte d'espérance de vie » [22]. Cette analyse fondée sur des données scientifiques montre que le risque lié à la production d'électricité par les centrales nucléaires est bien inférieur aux autres risques liés à la vie quotidienne [22].

Cette évaluation objective des risques relatifs est à mettre en relation avec le fait qu'il y a souvent une différence notable entre la perception du risque qu'un événement se produise et la véritable probabilité qu'il se produise. Un faible risque d'accident majeur est perçu différemment d'un grand risque d'accident mineur, bien que le total des décès annuels puisse être le même dans les deux cas. Ceci est particulièrement vrai de la perception générale de l'énergie nucléaire où la radioactivité entre en jeu.

La radioactivité – le phénomène de désintégration ou de transformation spontanée d'un noyau atomique en un autre, accompagnée de l'émission de rayonnement alpha, bêta ou gamma, appelées radiations ionisantes – est un aspect de la nature qui existait bien avant la formation de notre planète. On trouve des éléments radioactifs tels le thorium et l'uranium dans plusieurs régions du monde. Leur abondance dans l'écorce terrestre est d'environ 7,2 mg de thorium par kilo d'écorce [23] et 2,4 mg d'uranium par kilo d'écorce [24]. Ces deux éléments se désintègrent, produisant du radium et du radon ; ce dernier est un gaz rare radioactif dont les émanations issues des gisements de minerai sont une source particulièrement importante de radioactivité naturelle au voisinage de tels gisements. On trouve également de la radioactivité dans la faune et la flore. Par exemple, le carbone-14 (C-14), radioactif, est produit continûment par des réactions nucléaires qui ont lieu dans l'atmosphère terrestre sous l'effet du flux intense de rayons cosmiques du système solaire. Il pénètre la biosphère et la chaîne alimentaire de tous les êtres vivants. De plus, les os de tous les animaux et de l'homme contiennent, par exemple, du potassium (K) ; son isotope radioactif, K-40, (qui en représente 0,0117 %), a une durée de vie plus longue que l'âge de la terre. En tout, chez un

individu de taille moyenne, âgé de 25 ans et pesant 70 kg, il se produit environ 9 000 désintégration radioactives par seconde [25].

On affirme souvent que les centrales nucléaires émettent des matières radioactives en quantités potentiellement dangereuses. De nombreux pays ont des règlements qui fixent des limites à ne pas dépasser concernant à la fois les émissions de matières ionisantes par les gaz d'évacuation et les effluents et les immissions dans l'environnement (voir, pour ce qui concerne l'Allemagne, le *Federal Immission Control Act of Germany* [26]) ; l'observance de ces limites est strictement surveillée. De plus, l'exploitation des centrales par l'industrie nucléaire et les réacteurs de recherche sont tout deux sujets à des réglementations strictes dont l'observance est contrôlée par des agences gouvernementales indépendantes qui peuvent avoir l'autorité d'ordonner l'arrêt d'une installation en cas de violations. On a constaté que les émissions et les immissions au voisinage des centrales nucléaires n'excèdent pas, et de loin, les fluctuations des radiations de bruit de fond [27]. Il faut noter également que les centrales à charbon émettent également des matières radioactives puisque le charbon contient de 0,05 à 3 mg d'uranium par kg [28]. Tant l'uranium lui-même que ses produits de désintégration ne peuvent être captés entièrement par des filtres ; ils sont relâchés vers l'environnement [29].

Une autre affirmation répandue est qu'une incidence plus élevée de leucémies serait observée au voisinage d'installations nucléaires. Cependant, des études ont montré que « l'agglutination locale de leucémies se produit indépendamment des installations nucléaires² » [30] voir aussi [31]. Le nombre de cas de cancers dus à l'accident de Tchernobyl a été examiné par l'OMS [21]. Nous avons évoqué ci-dessus les résultats de cette étude.

La sûreté des centrales nucléaires est une question importante. Son amélioration est une des raisons pour lesquelles une nouvelle génération de réacteurs est à l'étude. Ils sont construits de manière à ce qu'une fusion du cœur soit physiquement impossible ou bien, si ce cas limite est possible, il est inclus dans la conception du réacteur de telle sorte que ses conséquences restent confinées dans l'enceinte du réacteur et n'affectent en rien l'environnement. De plus, le système de confinement du réacteur est conçu pour résister à l'impact d'un avion.

Les déchets

Chaque année, dans le monde, 10 500 tonnes de combustible usé sont déchargées des réacteurs nucléaires [32]. Le combustible usés doit être soit retraité, soit isolé de l'environnement

² NdT : notre traduction de la citation en anglais.

pendant des milliers d'années afin d'éviter des dommages à la biosphère. Tous les noyaux radioactifs que contiennent les déchets se désintègreront au cours du temps pour donner finalement des noyaux stables. Les nucléides des déchets radioactifs, s'ils sont ingérés ou respirés, représentent pour les êtres vivants un danger qui diffère selon leur mode de désintégration, leur taux de désintégration et leur temps de rétention. Ce danger peut être quantifié en termes de radiotoxicité, qui représente une mesure de sa nocivité. Parmi les nucléides dont la radiotoxicité est élevée on trouve les isotopes à vie longue du plutonium et les actinides mineurs (AM), surtout le neptunium, l'américium et le curium, alors que les produits de fission, dont la vie moyenne est en général plus courte, sont moins radiotoxiques. De plus, leur radiotoxicité diminue rapidement avec le temps. Les déchets radioactifs n'émanent pas seulement du fonctionnement et du démantèlement des centrales nucléaires mais aussi de la médecine nucléaire et des laboratoires de recherche scientifique. L'entreposage des ces déchets à faible et moyenne activité dans des dépôts adaptés n'est pas un souci majeur et plusieurs pays le pratiquent actuellement. Il faut noter que tous les pays européens dans lesquels fonctionnent des centrales nucléaires (voir le tableau 1) et d'autres qui utilisent des matières radioactives ou des radiations ionisantes ont signé le « *Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management* (convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible usé et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs) » de l'AIEA [33].

Cependant, la gestion à long terme du combustible usé est une question majeure. A court terme, la gestion du combustible usé a été pratiquée en toute sécurité dès les premiers moments des réacteurs nucléaires. Après son déchargement du réacteur, le combustible usé est entreposé sur site, dans une piscine remplie d'eau pour permettre la désintégration des noyaux radioactifs à vie courte. Ensuite, soit le combustible est retraité pour en extraire l'uranium et le plutonium par des méthodes chimiques en vue de les réutiliser comme combustible soit, dans le cas du cycle sans retraitement, il est conditionné (surtout par vitrification) en vue d'un stockage à long terme en couche géologique profonde. Dans le cas du cycle sans retraitement, le combustible usé doit être stocké pendant au moins 170 000 ans pour atteindre le niveau de radiotoxicité de l'uranium d'où il provient. Le fait de retirer 99,9 % du plutonium et de l'uranium réduit le temps de stockage à environ 16 000 ans et les techniques avancées de recyclage, qui retirent également les actinides mineurs (AM) permettraient de réduire le temps de stockage de sûreté des produits de fission restants à un peu plus de 300 ans [34]. Les AM récupérés doivent alors être transmutés pour donner des produits de fission à plus courte vie ou incinérés dans des unités dédiées qui seront décrites plus loin.

L'exclusion durable de l'eau est le principal problème à résoudre dans les stockages géologiques profonds. Les sites envisageables pour de tels stockages ont été identifiés dans plusieurs pays et leur sûreté géologique à long terme a été étudiée en détail (cf. gestion du combustible usé du réacteur finnois en cours de construction à Olkiluoto [35]). Ce type de stockage résout le problème des déchets au moins momentanément et, dans certains cas, n'exclut pas la récupération de cette matière pour un retraitement futur [35], [36].

Prolifération et menaces terroristes

L'utilisation de matière fissile à des fins non-pacifiques fait l'objet de la plus grande attention ; voir [37]. Sur cette question, il faut faire la différence entre la fabrication de têtes nucléaires par les puissances dotées de l'arme nucléaire d'une part, et celle de bombes simples par des extrémistes d'autre part. Les têtes nucléaires des puissances sont construites à partir d'uranium hautement enrichi (UHE) ou de plutonium de qualité militaire ; celui-ci n'est pas produit dans les centrales nucléaires mais dans des réacteurs dédiés qui sont conçus pour produire surtout du Pu-239 [38]. L'uranium faiblement enrichi (UFE) tel celui qui est utilisé dans les centrales nucléaires ne convient pas pour faire un dispositif explosif. Le plutonium extrait du combustible usé n'a pas la bonne composition isotopique pour la production efficace et commode de bombes. Il convient de souligner, donc, que la production de plutonium par les centrales nucléaires n'est pas utile à l'élaboration de têtes nucléaires. La possibilité pour un pays donné de développer un programme d'armement nucléaire ne dépend pas simplement de l'existence de centrales nucléaires dans ce pays mais aussi de la disponibilité d'installations de retraitement et/ou d'enrichissement.

Une question différente est l'utilisation de matière fissile par des extrémistes. Une discussion de cette menace se trouve, par exemple, dans [39]. La matière fissile extraite chimiquement du combustible nucléaire usé pourrait, en principe, être utilisée par des extrémistes pour construire un dispositif nucléaire d'une capacité explosive relativement modeste, peut-être jusqu'à quelques kilo tonnes d'équivalent TNT [40] mais avec un relâchement de quantités considérables de débris radioactifs dans l'environnement (voir [41]). Il est concevable, également, qu'une bombe classique soit utilisée pour vaporiser une barre de combustible usé et disperser sa radioactivité. Pour empêcher de telles éventualités, le voisinage du matériel fissile est surveillé de près par des agences internationales telle l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) (voir aussi [42]). Comme le retraitement du combustible nucléaire exige une installation industrielle de grande taille, le processus peut en effet être contrôlé de près et tout détournement de matériel être évité de manière efficace. Dans un avenir prévisible, quelques uns des réacteurs de Génération IV

produiront beaucoup moins de plutonium en comparaison des réacteurs actuels (voir la section 5) [43].

Une autre menace qui ne peut être négligée réside dans la possibilité que des groupes extrémistes se procurent des armements nucléaires directement lors du démantèlement d'arsenaux d'armement nucléaire. Il est évident que, dans ce cas, la menace extrémiste n'a aucun rapport avec l'utilisation pacifique de la technologie nucléaire.

En tant que source d'énergie, la production nucléaire n'est pas dénuée de risques. La sûreté des centrales nucléaires, la gestion des déchets, une éventuelle prolifération et les menaces extrémistes sont de sérieux sujets d'inquiétude. A quel point les risques associés peuvent être estimés acceptables est une question de jugement qui doit prendre en compte les risques spécifiques des sources d'énergie alternatives. Ce jugement doit être rationnel et, se fondant sur les connaissances scientifiques, reposer sur un débat ouvert autour des faits établis associé à une comparaison avec les risques liés à d'autres sources d'énergie.

4. Cycles du combustible

La plupart des réacteurs actuellement en fonctionnement reposent sur la fission de l'U-235, qui se produit quand il est bombardé de neutrons thermiques (lents), d'où l'appellation 'réacteurs thermiques'. Le même processus a lieu avec le Pu-239 et l'U-233 qui sont générés dans les réacteurs thermiques via la capture d'un neutron par l'U-238 et le thorium 232 (Th-232), respectivement. Au contraire, la réaction nucléaire en chaîne dans les réacteurs rapides est entretenue avec des neutrons rapides (à énergie élevée). Il y a d'autres réacteurs thermiques, tels le réacteur à sels fondus et les réacteurs de type CANDU. Ces derniers peuvent fonctionner avec de l'uranium naturel, et c'est l'eau lourde qui sert de modérateur et de caloporteur. Ils peuvent, l'un et l'autre, produire suffisamment d'U-233 pour un fonctionnement continu pourvu que les produits de fission soient retirés à intervalle régulier. Les réacteurs rapides peuvent même produire plus de combustible (plutonium) qu'ils n'en consomment (réacteurs surgénérateurs rapides). Au-delà de cette classification, on peut distinguer deux grands types de réacteurs en fonction de leur cycle de combustible : à cycle ouvert (prépondérant aux Etats-Unis) et à cycle fermé (choisi, par exemple, en France). Nous allons exposer ces deux cycles séparément, car à chacun ses avantages et ses

problèmes particuliers. Tout d'abord, cependant, il faut examiner la question des réserves de minerai d'uranium.

Réserves de minerai d'uranium

Les ressources conventionnelles d'uranium sont estimées à 14,8 millions de tonnes, dont environ 4,7 millions de tonnes sont des ressources prouvées. Celles-ci sont accessibles et récupérables à un coût inférieur à \$130/ kg d'uranium [44,45]. Le complément, d'environ 10 millions de tonnes, est une estimation faite à partir d'investigations, d'explorations, et de connaissances géologiques détaillées désignant des zones géographiques vraisemblables. Ce nombre est probablement une sous estimation, dans la mesure où seuls 43 pays ont rendu un rapport dans cette catégorie.

D'autres ressources incluent les ressources d'uranium non conventionnelles (minerai à très faible teneur) et d'autres combustibles nucléaires potentiels (p.ex. le thorium). La plupart des gisements non-conventionnels correspondent à des phosphates contenant de l'uranium (environ 22 millions de tonnes) mais il y a d'autres sources, comme l'eau de mer et l'argile schisteuse. Ces ressources seront vraisemblablement exploitées si le prix de l'uranium augmente. Le thorium est abondant, avec plus de 4,5 millions de tonnes [46] bien que les données manquent pour beaucoup de pays susceptibles d'avoir des gisements de thorium.

Ces nombres sont à comparer avec la demande annuelle d'uranium qui, en 2005, a été d'environ 67 kilo tonnes [19]. Une augmentation de la demande mondiale d'uranium liée aux réacteurs est prévue, pour atteindre de 82 à 101 kilo tonnes en 2025. La demande des régions nord-américaine et européenne stagnerait ou diminuerait légèrement alors que celle du reste de monde devrait croître [44]. Au vu de ces estimations, on peut penser qu'il y a assez d'uranium pour alimenter les réacteurs nucléaires en cycle ouvert pendant encore 50 ans. Avec un cycle du combustible fermé, il y aurait suffisamment d'uranium pour des milliers d'années (voir ci-dessous).

Le cycle ouvert ou à passage unique

Après extraction, le minerai d'uranium est converti en hexafluorure d'uranium, UF_6 . Un enrichissement isotopique est pratiqué sur l' UF_6 pour augmenter la concentration de noyaux fissiles U-235 jusqu'à 4,6 %. La concentration en U-235 de l'uranium naturel, 0,72 %, est trop faible pour une utilisation dans la plupart des réacteurs, sauf ceux de type CANDU qui peuvent fonctionner avec de l'uranium naturel. Le fluorure est ensuite converti en oxyde d'uranium enrichi, UO_2 , avec lequel on fabrique des pastilles que l'on assemble en crayons. Ces crayons restent en réacteur jusqu'à quatre ans, alors que la réaction en chaîne de fission nucléaire contrôlée libère

continuellement de l'énergie qui est convertie en électricité. Chaque étape de la production est en soi un processus industriel complet.

Parce que les crayons de combustible usé ne sont pas retraités, tous les actinides mineurs et, en particulier, le plutonium, restent dans les crayons de combustible sous une forme telle qu'il ne peut être utilisé commodément pour une production efficace d'armes. Cette sûreté inhérente vis-à-vis de la prolifération est l'avantage principal du cycle du combustible à passage unique. On trouvera dans [47] d'autres avantages de ce mode opératoire.

L'inconvénient majeur de cette solution est la production de déchets radioactifs qui doivent être stockés pendant des centaines de milliers d'années avant que le niveau de radiotoxicité soit ramené à celui du minerai naturel. Ce cycle du combustible gaspille de l'uranium et du plutonium fissiles. Par exemple, dans les réacteurs à eau légère actuels, l'enrichissement initial en U-235 est de 3,3% et il est encore de 0,86% dans le combustible usé [48]. Avec ce cycle du combustible, l'uranium disponible sur le plan mondial ne suffirait à la demande que pour les 50 ans à venir.

Le cycle fermé

Les procédés pour un réacteur à cycle fermé suivent pour l'essentiel les mêmes étapes que pour le cycle ouvert. La différence principale est que le combustible usé est traité chimiquement (procédé PUREX – *Pluonium-Uranium Recovery by Extraction* c'est-à-dire récupération du plutonium et de l'uranium par extraction) le plutonium et l'uranium étant récupérés pour une utilisation en combustible MOX (Mixed oxide) [49]. L'extraction de l'uranium et du plutonium à partir du combustible usé est réalisée couramment à La Hague (France), Sellafield (Royaume Uni), Rokkasho (Japon), et Mayak (Russie). Les AM ne sont pas extraits et ils constituent l'essentiel des déchets radioactifs à vie longue qui doivent être stockés en sécurité (voir ci-dessus : déchets) ou incinérés/transmutés (voir ci-dessous : perspectives d'avenir pour la gestion du combustible usé). Bien entendu, la séparation est un procédé de grande échelle dont les risques ont été évoqués ci-dessus (voir : prolifération et menaces terroristes). Dans les installations actuellement actives dans ce domaine, les isotopes séparés sont strictement surveillés par des organismes internationaux qui en font un suivi.

Un avantage du cycle du combustible fermé est la réduction appréciable de la demande en minerai d'uranium. La matière recyclée peut être utilisée dans des réacteurs surgénérateurs rapides qui sont cent fois plus efficaces. Avec les réserves actuellement connues de minerai d'uranium, des réacteurs à fission pourraient fonctionner 5 000 ans au lieu de seulement 50 ans avec le cycle du combustible sans retraitement. Une réduction de la demande de minerai d'uranium réduira l'effet

environnemental de l'extraction minière et, de plus, diminuera les tensions géopolitiques et économiques autour de l'accès au minerai d'uranium. Un autre cycle du combustible fermé repose sur le thorium [50] qui est 3 à 4 fois plus abondant que l'uranium.

Perspectives d'avenir pour la gestion du combustible usé

L'alternative à un stockage de très longue durée du combustible usé est de l'incinérer (brûler) dans des réacteurs dédiés ([43], voir ci-dessous) ou de transmuter les isotopes à vie longue en isotopes à vie courte par des systèmes hybrides (ADS – *Accelerator Driven System* – réacteur sous-critique alimenté en neutrons par un accélérateur de particules). Les deux procédés impliquent la séparation non seulement de l'U/Pu mais aussi des AM. L'efficacité de la séparation atteint 99,9% ; l'efficacité attendue pour l'incinération/transmutation, cependant, n'est que de 20%. Ainsi, plusieurs cycles successifs de séparation, puis incinération/transmutation sont nécessaires pour réduire de façon significative la quantité de matière radioactive à vie longue [34]. Puis, après environ trois cents ans, une durée pendant laquelle un stockage sûr est facilement envisageable, la radiotoxicité du combustible usé atteint un niveau inférieur à celle de l'uranium dont il est issu.

Au cours des dernières décennies, des solutions prometteuses pour la transmutation basées sur les systèmes hybrides (ADS) ont été étudiées [51]. Tant en Europe qu'en Asie, ce concept nouveau continue d'être exploré. L'idée de base du réacteur hybride est d'associer un réacteur à fission avec un accélérateur de protons de haute énergie à forte intensité de courant. L'accélérateur est utilisé pour produire un flux très intense de neutrons qui induisent des fission dans une cible d'uranium, plutonium et AM. Les neutrons sont nécessaires au démarrage et pour entretenir le processus de fission, aucune réaction en chaîne auto-entretenu n'étant impliquée. En principe, un tel système hybride pourrait transmuter des déchets radioactifs pour en faire des produits de fission à faible durée de vie et en même temps produire de l'énergie.

Un projet lancé dans le cadre du 6^{ième} PCRD de la Commission Européenne doit concevoir la première installation expérimentale qui permettra de valider la faisabilité de la transmutation avec un ADS. En parallèle, l'élaboration d'un schéma conceptuel pour une réalisation modulaire de niveau industriel est en cours [52]. Ces études doivent également inclure les questions de fiabilité et de compétitivité économique. De tels systèmes hybrides pourront, outre l'incinération des déchets, contribuer de façon significative à la production massive d'énergie au-delà de 2020. Les ADS sont en concurrence avec les réacteurs de Génération IV qui sont également conçus pour une incinération efficace des AM (voir le chapitre suivant pour les réacteurs Génération IV).

Tant les réacteurs nucléaires à cycle ouvert que ceux à cycles fermés produisent de l'énergie à partir d'un combustible composé de noyaux lourds, grâce aux fissions induites par des neutrons. Les déchets qu'ils produisent sont gérés différemment. Les systèmes à cycle ouvert sont attractifs du point de vue de la sécurité. Les systèmes à cycle fermé récupèrent du combustible utilisable dans leurs déchets ce qui leur permet de diminuer la consommation de minerai d'uranium.

5. L'électronucléaire du futur

Les réacteurs nucléaires innovants

Les scénarios énergétiques pour les 50 ans à venir montrent qu'il est essentiel de garder ouverte l'option nucléaire pour la production d'électricité. Cependant, les types de réacteurs en usage aujourd'hui et le cycle du combustible basé sur l'U-235 qui leur est associé produisent une grande quantité de déchets potentiellement dangereux alors que, pour certains types de réacteurs, le risque qu'un événement catastrophique se produise est excessivement élevé. Du fait de ces problèmes de sécurité et de la relation faite entre l'énergie nucléaire et l'accident de Tchernobyl d'une part et les armes nucléaires d'autre part, l'industrie nucléaire se trouve confrontée à une forte hostilité dans certains pays européens.

Pour y répondre, les réacteurs de Génération III (GenIII) ont été mis au point, tel le *European Pressurised Reactor* (EPR – réacteur européen à eau pressurisée) dont une unité est en construction à Olkiluoto en Finlande ; il constitue une avancée dans les techniques de sécurité [35]. Il bénéficie d'une prévention avancée des accidents éventuels qui réduit encore plus la probabilité de dégâts au cœur du réacteur. L'amélioration du contrôle de la situation en cas d'accident assurera que, dans l'éventualité très improbable d'une fusion du cœur, toute la matière radioactive restera confinée dans l'enceinte de confinement et que les conséquences d'un tel accident seront limitées à l'installation elle-même. La résistance à l'impact direct d'un avion sera améliorée également, y compris celui d'un gros avion de ligne.

En 2001, plus de 100 experts, d'Argentine, du Brésil, du Canada, du Japon, de la Corée, de l'Afrique du Sud, de Suisse, de Grande Bretagne, des Etats-Unis, de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique, et de l'Agence de l'énergie nucléaire de l'OCDE ont commencé à réfléchir ensemble à la définition d'objectifs à satisfaire pour de nouveaux systèmes, à identifier les concepts les plus prometteurs, à les évaluer, et à déterminer les efforts de recherche et développement (R&D) à mettre en œuvre. Dès la fin de 2002, ce travail a abouti à la description de six systèmes et à l'évaluation des besoins de R&D associés [43]. Dans la spécification des réacteurs de Génération

IV, (GenIV), une attention toute particulière est portée à la sécurité. Une des exigences clés est l'exclusion d'un accident comme celui de Tchernobyl dans lequel une quantité considérable de matières radioactives a été relâchée à l'environnement. De plus, ces réacteurs amélioreront l'économie de la production électrique, réduiront la quantité de déchets nucléaires à traiter ou à stocker, augmenteront la résistance à la prolifération, et introduiront de nouvelles applications tels la production d'hydrogène pour le secteur des transports (voir le Tableau 2). La possibilité d'utiliser le cycle thorium-uranium est également envisagée. Ses avantages – par exemple l'impossibilité, de par les lois de la physique, de produire du plutonium et/ou des actinides mineurs et, par conséquent, la réduction de la radiotoxicité des déchets par un facteur environ 1000 par rapport au cycle uranium sans retraitement – ont été abordés dans un article récent [53].

Tableau 2: Réacteurs GenIV et quelques unes de leur propriétés particulières, extrait de [43]

GFR	Réacteur rapide à gaz (<i>Gas-cooled Fast Reactor</i>)	Gestion efficace des actinides – cycle du combustible fermé; Fournit de l'électricité, de l'hydrogène, ou de la chaleur
LFR	Réacteur rapide au plomb (<i>Lead-cooled Fast Reactor</i>)	Petite unité construite en usine; cycle fermé avec intervalle de rechargement du combustible long (15-20 ans). Transportable pour une production d'énergie distribuée, eau potable, hydrogène. Les LFR de grande taille sont également envisagés.
MSR	Réacteur à sels fondus (<i>Molten Salt Reactor</i>)	Conçus pour une incinération efficace de Pu et AM ; pas de fabrication du combustible puisque le combustible est liquide ; sûreté intrinsèque. Considéré le meilleur en terme de durabilité ; bien adapté au cycle du thorium.
SFR	Réacteur rapide au sodium (<i>Sodium-cooled Fast Reactor</i>)	Gestion efficace des actinides; conversion de l'U fertile; cycle fermé
SCWR	Réacteur à eau super-critique (<i>Super Critical Water-cooled Reactor</i>)	Production efficace d'électricité; possibilité de gestion des actinides; cycle uranium sans retraitement dans la forme simple ; cycle fermé possible aussi.
VHTR	Réacteur à gaz à très haute température (<i>Very-High Temperature Reactor</i>)	Cycle uranium sans retraitement ; production d'électricité, et de chaleur pour l'industrie pétrochimique, production thermochimique d'hydrogène.

Bien que des recherches soient encore nécessaires, quelques uns de ces systèmes devraient être opérationnels dès 2030. Avec les cycles de combustible les plus avancés, en association avec le recyclage, une grande partie des matières fissiles à longue durée de vie sont incinérées, si bien que les besoins d'isolement pour les déchets sont réduits à quelques centaines d'années au lieu de centaines de milliers d'années.

Il est trop tôt pour juger des avantages comparés des ADS et des réacteurs Gen IV comme systèmes de production d'énergie et d'incinération/transmutation des déchets, mais les caractéristiques favorables des deux sont évidentes. Pour une étude comparative, voir [54].

Les réacteur nucléaires à fusion

Une autre option pour la production d'énergie nucléaire sans émissions de CO₂ dues au combustible est le processus de fusion nucléaire. En 2005, un pas important vers sa réalisation a été fait avec la décision de construire un réacteur thermonucléaire expérimental international, ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) [55] à Cadarache, en France. Dans ce réacteur, du deutérium et du tritium sont fusionnés pour former de l'hélium-4 et un neutron qui emporte 80 % de l'énergie libérée. L'hélium-4 représente la « cendre non radioactive » du processus de fusion. En fonctionnement, un tel réacteur génère le tritium, combustible nécessaire, à partir de lithium. Le deutérium est un isotope lourd de l'hydrogène qui est disponible dans la nature, en quantité pratiquement illimitée. Les ressources mondiales de lithium sont estimées à 12 millions de tonnes [56], elles sont suffisantes pour que l'on puisse envisager la fusion nucléaire comme source d'énergie pour une durée considérable. La construction d'un électro-générateur à fusion utilisera des matériaux dont, après une activation inévitable par les neutrons, la radioactivité décroît relativement vite pour atteindre en l'espace de cent ans le niveau où on peut les manipuler. Après ce délai, les matériaux peuvent être manipulés sans danger sur un établi. L'expérience acquise dans la manipulation du tritium radioactif justifie l'affirmation que la fusion est une source d'énergie très sûre. Cependant, la fusion nucléaire n'est susceptible de fournir de l'énergie en quantité significative que dans la deuxième moitié de ce siècle au plus tôt parce que la technologie des réacteurs à fusion demande encore beaucoup de R&D.

Les nouveaux concepts de réacteurs (GenIV) satisferont des critères exigeants de durabilité et fiabilité pour la production d'énergie, ainsi que de sûreté et non-prolifération. La fission et la fusion nucléaires auront la capacité de contribuer de façon significative à la satisfaction des besoins futurs en électricité.

6. Conclusion

Nos réflexions conduisent aux conclusions suivantes :

- Aucune source unique d'énergie ne pourra satisfaire les besoins des générations futures.
- L'électronucléaire peut et devrait contribuer de façon importante à un portfolio de sources d'électricité.
- Les réacteurs nucléaires modernes reposant sur une technologie qui a fait ses preuves et mettant en œuvre une prévention avancée des accidents, y compris des systèmes de sûreté passive, rendront un accident du type de celui de Tchernobyl avec toutes ses conséquences, impossible en pratique.
- Une recherche approfondie et de long terme, des programmes de développement et des démonstrateurs (RD&D), comprenant toutes les options possibles pour une production durable

d'énergie, doivent être lancées et/ou poursuivies. La RD&D pour toute solution particulière devrait être dirigée vers la réalisation et l'évaluation d'un système de démonstration opérationnel, par exemple, un système basé sur un des réacteurs Génération IV.

- La transmutation des déchets au moyen du système hybride prometteur (ADS), ou de réacteurs GenIV devrait être recherchée ; là encore, les prochaines étapes nécessaires sont des développements techniques et des installations de démonstration.
- Il convient également d'étudier la possible extension de la durée de vie des réacteurs existants.
- L'option nucléaire devrait signifier que l'on envisage à la fois les solutions à fission et à fusion pour la production d'énergie.
- Au vu du temps nécessairement long entre la démonstration et la réalisation industrielle de toute solution proposée, le potentiel de l'option nucléaire pour la période au-delà de 2020 ne peut être évalué que sur la base d'efforts de RD&D considérablement plus intenses et étendus. De tels efforts exigent la coopération des chercheurs et des décideurs politiques afin d'évaluer la production d'énergie en termes de sécurité et en termes économiques sur la durée.
- La proposition de la Commission Européenne de mai 2006 de mettre en œuvre une politique énergétique commune au niveau européen doit se réaliser. Cette politique a pour but de permettre à l'Europe de faire face aux défis d'approvisionnement énergétique futurs et aux effets que ceux-ci auront sur la croissance et l'environnement [57] ; elle suit les lignes du Livre Vert de la CE sur la stratégie pour la sécurité de l'approvisionnement énergétique [58].
- Un programme de RD&D pour l'option nucléaire exige aussi le soutien de la recherche fondamentale dans les domaines du nucléaire et des sciences des matériaux, condition d'accession à la connaissance nécessaire pour élaborer des solutions techniques innovantes.
- L'Europe doit se maintenir au niveau des développements dans la conception des réacteurs indépendamment de toute décision concernant leur construction en Europe. C'est une raison secondaire importante qui justifie des investissements en RD&D pour les réacteurs nucléaires et c'est essentiel si l'Europe doit être capable de suivre des programmes dans les pays en développement rapide tels que la Chine et l'Inde, qui sont décidés à construire des centrales électronucléaires, et participer ainsi à en assurer la sécurité, par exemple à travers une participation active dans l'AIEA.
- La RD&D doit se faire à l'échelle mondiale. Les problèmes associés à la production d'énergie nucléaire durable et à grande échelle, comme la gestion des déchets, la sûreté, la non-prolifération, l'acceptabilité par le public vont bien au-delà des frontières nationales.
- Les responsables de décisions doivent se rendre compte de l'urgence qu'il y a à résoudre la question de l'effet de serre dans le cadre d'une stratégie énergétique bien définie, en incitant et finançant la RD&D y compris pour l'option nucléaire. La Commission Européenne prend déjà en compte ce concept fondamental [59].
- Afin d'obtenir l'acceptation du public et son soutien, un programme d'information responsable et non biaisé sur tous les aspects de la production d'énergie nucléaire est nécessaire, soutenu par un programme d'information du public qui l'aide à mieux comprendre et juger les risques technologiques et l'évaluation des risques dans une économie industrialisée. Il faut faire le nécessaire pour informer le public des questions de sûreté à court et à long terme et de l'impact écologique des différentes technologies qui interviennent dans les régions hautement industrialisées d'Europe. Si la technologie nucléaire doit contribuer à la satisfaction des besoins

énergétiques futurs et aider à améliorer les effets environnementaux désastreux d'autres sources d'énergie, il est essentiel d'obtenir l'accord de la société. Sans cela, les développements innovants pourraient être retardés, voire arrêtés par l'opinion publique.

Aucune source unique ne sera en mesure de répondre aux besoins en énergie des générations futures. L'option nucléaire, en incluant les avancées majeures récentes en technologie et sûreté devrait représenter une des composantes principales de l'approvisionnement énergétique futur. Il y a clairement un besoin de programmes à long terme de recherche, de développement, et de démonstration, aussi bien que de recherche fondamentale concernant tant la fission que la fusion nucléaires et des méthodes de transmutation et stockage des déchets. Il faut trouver des moyens d'informer le public en général sur la manière d'évaluer les risques relatifs de façon rationnelle. Chaque participant au processus de prise de décision a besoin d'être bien informé sur les questions d'énergie. C'est une tâche importante, pour la science et la recherche européennes d'assurer que cela se fasse.

Références (adresses Internet de l'original valables au 1 novembre 2007. NdT : références en anglais vérifiées et mises à jour en mai 2008 ; références en français ajoutées)

- [1] World Commission on Environment and Development, Our Common Future (New York: Oxford University Press, 1987)
- [2] Statistical Office of the European Communities
<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/>
Voir également :
Europe in figures, eurostat yearbook 2006-07, ISBN 92-79-02489-2
Version électronique:
http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-CD-06-001-ENERGY/FR/KS-CD-06-001-ENERGY-FR.PDF
- [3] Helmut Geipel, Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Berlin, Germany, at Greenpeace Workshop on "Klimaschutz durch CO₂-Speicherung Möglichkeiten und Risiken" (en allemand)
http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/energie/Geipel_BMWA_CCS_50926.pdf
- [4] Externalities of Energy. A Research Project of the European Commission
<http://www.externe.info>
- [5] Uranium Information Centre Ltd., GPO Box 1649N, Melbourne, Australia
<http://www.uic.com.au/nip100.htm>
- [6] Öko-Institut e.V. (Institute for Applied Ecology) Postfach 50 02 40, 79028 Freiburg, Germany
<http://www.oeko.de/service/gemis/en/index.htm>
- [7] World Information Service on Energy (WISE), P.O. Box 59636, 1040 LC Amsterdam, The Netherlands
<http://www.nirs.org/mononline/nukesclimatechangereport.pdf>
- [8] Voir également : Parliamentary Office of Science and Technology (October 2006, No. 268): Carbon Footprint of Electricity Generation
<http://www.parliament.uk/documents/upload/postpn268.pdf>
- [9] http://auto.ihs.com/news/2006/eu-en-auto-emissions.htm?wbc_purpose=Ba
- [10] International Panel on Climate Change, IPCC-report 2007, Working group I
<http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>
- [11] Gesellschaft für ökologische Forschung e.V., Frohschammerstr. 14, 80807 München
<http://www.gletscherarchiv.de/202006past1.htm>, (en Allemand)
- [12] International Panel on Climate Change, IPCC-report 2007, WG III
<http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg3.htm>
- [13] Kyoto-Protocol
<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.html>

- [14] Energy to 2050: Scenarios for a Sustainable Future (2003), International Energy Agency (IEA/OECD) Paris, France.
http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2000/2050_2003.pdf
- [15] The Role of Nuclear Power in Europe, World Energy Council, 2007
http://www.cna.ca/english/pdf/Studies/WEC_Nuclear_Full_Report.pdf
- [16] World Energy Outlook, International Energy Agency, 9 rue de la Fédération, 75015 Paris, France
www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/weo2004.pdf
- [17] Institute of Physics Report: The Role of Physics in Renewable Energy, RD&D, 2005
http://www.iop.org/activity/policy/Publications/file_4145.pdf
- [18] http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/fr/com/2007/com2007_0002fr01.pdf
- [19] World Nuclear Association, 22a St James's Square, London SW1Y 4JH, United Kingdom
<http://www.world-nuclear.org>
- [20] Paul Scherrer Institut (PSI), 5332 Villigen, Schweiz, Technology Assessment/ GaBE
<http://gabe.web.psi.ch/research/ra/>
- [21] World Health Organisation, Avenue Appia 20, CH - 1211 Geneva 27, Switzerland
<http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2005/pr38/en/index.html> (en anglais)
<http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2005/pr38/fr/index.html> (en français)
- [22] Bernard L. Cohen: *Before it's too late*; Springer 1983, ISBN-13: 978-0306414251, and
http://www.ecolo.org/documents/documents_in_english/Bernard.Cohen.rankRisks.htm
- [23] Mineral Information Institute, 505 Violet Street, Golden CO 80401, USA
<http://www.mii.org/Minerals/photothorium.html>
- [24] Deutsche Zentrale für Biologische Information,
<http://www.biologie.de/biowiki/Uran> (en allemand)
- [25] Martin Volkmer, Radioaktivität und Strahlenschutz (en allemand),
Courier Druckhaus, Ingolstadt, 2003, ISBN 3-926956-45-3,
(Nouvelle édition en allemand)
http://www.ktg.org/r2/documentpool/de/Gut_zu_wissen/Materialien/Downloads/013radioaktivitaet_strahlenschutz2007.pdf
- [26] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit,
Alexanderstraße 3, 10178 Berlin, Germany (en allemand)
http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/anhang_a.pdf
- [27] Niedersächsisches Umweltministerium; Archivstraße 2, 30169 Hannover,
Germany (en allemand)
http://www.umwelt.niedersachsen.de/master/C24150382_N23066970_L20_D0_I598.html

- [28] Zur Geochemie und Lagerstättenkunde des Urans, (en allemand)
Gebrüder Borntraeger, Berlin Nikolasse, 1962, ISBN 3-443-12001-6
- [29] Strahlenschutzkommission, Geschäftsstelle beim Bundesamt für
Strahlenschutz, Postfach 12 06 29, 53048 Bonn, Germany
<http://www.ssk.de/werke/volltext/1981/ssk8102.pdf> (en allemand)
- [30] Deutsches Krebsforschungszentrum, Im Neuenheimer Feld 280,
69120 Heidelberg, Germany,
http://web.archive.org/web/20050430173258/http://www.dkfz.de/epi/Home_d/Programm/AG/Praevient/Krebshom/texte/englisch/204.htm
- [31] R. Neth: *Radioaktivität und Leukämie*, Deutsches Ärzteblatt 95,
Ausgabe 27, 03.07.1998, S. A-1740 / B-1494 / C-1386 (en allemand)
<http://www.aerzteblatt.de/v4/archiv/artikeldruck.asp?id=12227>
- [32] http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC51/GC51InfDocuments/English/gc51inf-3_en.pdf
- [33] <http://www-ns.iaea.org/conventions/waste-jointconvention.htm>
- [34] A. Geist et al.: *Reduzierung der Radiotoxizität abgebrannter Kernbrennstoffe durch Abtrennung und Transmutation von Actiniden: Partitioning*, NACHRICHTEN-Forschungszentrum Karlsruhe Jahrgang 36(2004) p. 97-102
<http://bibliothek.fzk.de/zb/veroeff/58263.pdf>
- [35] Posiva Oy, 27160 Olkiluota, Finland
<http://www.posiva.fi/englanti/>
- [36] The Long Term Storage of Radioactive Waste: Safety and Sustainability;
A Position Paper of International Experts, IAEA 2003
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/LTS-RW_web.pdf
- [37] Gerald E. Marsh and George S. Stanford: *Bombs, Reprocessing, and Reactor Grade Plutonium*; Forum on Physics and Society of the American Physical Society, April 2006, Vol. 35, No. 2
<http://www.aps.org/units/fps/newsletters/2006/april/article2.html>
- [38] Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium, National Academy of Sciences (U.S.), Panel on Reactor-Related Options, 1995
http://www.ccnr.org/reactor_plute.html
- [39] NuclearFiles.org, A Project of the Nuclear Age Peace Foundation,
1187 Coast Village Road, Santa Barbara CA 93108-2794, USA
<http://www.nuclearfiles.org/menu/key-issues/nuclear-weapons/issues/terrorism/introduction.htm>
- [40] J. Carson Mark, Science & Global Security, 1993, Vol. 4, pp 111-128
http://www.fissilematerials.org/ipfm/site_down/sgs04mark.pdf
- [41] Making the Nation Safer - The Role of Science and Technology in Countering Terrorism. In:
The National Academy Press (Washington DC, USA) 2002;
http://books.nap.edu/catalog.php?record_id=10415

- [42] nuclearfiles.org, A Project of the Nuclear Age Peace Foundation
1187 Coast Village Road, Santa Barbara CA 93108-2794, USA
<http://www.nuclearfiles.org/menu/key-issues/nuclear-weapons/issues/proliferation/fuel-cycle/index.htm>
- [43] A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy System, issued by the U.S.DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, Decembre 2002,
<http://www.gen-4.org/Technology/roadmap.htm>
- [44] Resources, Production and Demand, A Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency ("Red Book", 21st edition)
<http://www.nea.fr/html/ndd/reports/2006/uranium2005-english.pdf>
<http://www.nea.fr/html/ndd/reports/2006/uranium2005-francais.pdf>
- [45] International Atomic Energy Agency, P.O. Box 100, Wagramer Strasse 5, A-1400 Vienna, Austria
<http://www.iaea.org/NewsCenter/Statements/DDGs/2006/sokolov01062006.html>
- [46] The 2005 IAEA-NEA "Red Book", quoted in
<http://www.world-nuclear.org/info/inf62.html>
- [47] Frank N. von Hippel: *Plutonium and Reprocessing of Spent Nuclear Fuel*; Science, 293 (2001) 2397-2398
<http://www.princeton.edu/~globsec/publications/pdf/Sciencev293n5539.pdf>
- [48] Martin Volkmer, Kernenergie Basiswissen (en allemand), Courier Druckhaus, Ingolstadt, 2003, ISBN 3-926956-44-5, nouvelle édition (également en allemand)
<http://lbs.hh.schule.de/klima/energie/kernenergie/basiswissen2004.pdf>
- [49] AREVA Head Office, 27 – 29 rue Le Peltier, 75433 Paris cedex , France
http://www.arevaresources.com/nuclear_energy/datagb/cycle/indexREP.htm
- [50] Shaping the Third Stage of Indian Nuclear Power Programme, Government of India, Department of Energy
<http://www.dae.gov.in/publ/3rdstage.pdf>
- [51]
http://cdsagenda5.ictp.trieste.it/askArchive.php?base=agenda&categ=a04210&id=a04210s122t8/lecture_notes
- [52] <http://nuklear-server.ka.fzk.de/eurotrans/Start.html>
- [53] S. David et al. in *europhysicsnews* 2007, Vol. 38, no.2, p. 24
- [54] OECD Nuclear Energy Agency, Le Seine Saint-Germain12, boulevard des Îles, F-92130 Issy-les-Moulineaux, France
<http://www.nea.fr/html/ndd/reports/2002/nea3109.html>
- [55] <http://www.iter.org/>

[56] Mineral Information Institute, 505 Violet Steet, Golden CO 80401, USA

<http://www.mii.org/Minerals/photolith.html>

[57] SCADPlus: Green Paper: A European strategy for sustainable, competitive and secure energy

<http://europa.eu/scadplus/leg/en/lvb/l27062.htm>

<http://europa.eu/scadplus/leg/fr/lvb/l27062.htm>

[58]

http://ec.europa.eu/energy/green-paper-energy-supply/doc/green_paper_energy_supply_en.pdf (en anglais)

http://ec.europa.eu/energy/green-paper-energy-supply/doc/green_paper_energy_supply_fr.pdf (en français)

[59] <http://ec.europa.eu/energy/nuclear/doc/brusselsdemay2002.pdf>