

Juillet 1973

LRP 63/73

E N E R G I E

Compilation Bibliographique et Tabulation
des Ressources, de la Consommation et
des Déchets dans le Monde

M. Roux

Centre de Recherches en Physique des Plasmas
ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE

E N E R G I ECompilation Bibliographique et Tabulation
des Ressources, de la Consommation et
des Déchets dans le Monde

M. Roux

A b s t r a c t

The available resources of fossil and nuclear fuels as well as those of solar energy, hydroelectric power and others are reviewed and compared to the global consumption of energy in the world, the USA, the Common Market and Switzerland. Without fission breeder reactors or thermonuclear fusion reactors, the world would be short of energy within a few centuries. The per capita and global consumption together with its growthrate, are presented and distributed with respect to primary energy sources and/or main sectors of use. Attention is focused on the energy required by the generation of electrical power. Estimates up to the year 2000 are also given. Due to a twofold increase both in the world population and in the per capita consumption, the energy demand by the year 2000 will be four times higher than its present level. Countries presently well-developed will show a lesser growth. Chemical and radioactive nuclear wastes resulting from the global energy consumption or the production of electrical power are tabulated and scaled to the energy consumption. Wastes from the nuclear economy are estimated up to the year 2000. The relative biological hazards pertaining to the radioactive inventories and wastes of fission reactors are compared to those of a reference fusion reactor. Appendix A presents information concerning units, exposures, concentrations and biological effects of radiation along with potential dangers of fission or fusion reactors. Appendix B lists the heat of combustion of fossil and nuclear fuels and defines some dimensions often encountered in the literature. An extensive bibliography is attached to this report.

Introduction

De tout temps, l'énergie a représenté un élément fondamental dans les conditions de vie de l'homme, depuis la domestication du feu jusqu'à celle de l'énergie nucléaire. Les besoins en énergie créés par l'industrialisation et ceux exigés par l'élévation du niveau de vie ont conduit à une demande croissante qui, dans un pays développé comme les Etats-Unis d'Amérique (USA), a progressé exponentiellement au taux d'environ 4 o/o par an, soit un doublement de la consommation tous les 17 ans, alors que dans la même période sa population n'a augmenté que de 1 o/o par an. Diverses études prévoient pour les USA un taux de croissance de 2,5 à 5,1 o/o par an jusqu'en l'an 2000. Quant au taux de croissance de la consommation mondiale actuel et estimé, il est supérieur encore à celui des USA.

Ces besoins énergétiques n'iront pas sans poser de nombreux problèmes. L'un des plus importants, sans doute, est celui des réserves qui ne sont pas inépuisables: 400 ans au plus pour le charbon, de l'ordre de 60 ans pour le pétrole et 50 pour le gaz naturel. Encore faut-il réaliser que ces chiffres impliquent l'extraction de la moitié de tout le charbon contenu dans la croûte terrestre et tiennent compte des découvertes prouvées, probables et futures en pétrole et en gaz. L'insouciance avec laquelle les combustibles fossiles ont été extraits et utilisés jusqu'ici conduit le monde à se satisfaire de ressources de qualité de plus en plus médiocre (richesse des filons, teneur en soufre), donc de prix de plus en plus élevés, et l'accule à développer d'urgence des moyens efficaces propres à valoriser l'énergie nucléaire. Là encore, les perspectives ne sont pas brillantes puisque, dans l'hypothèse d'une économie nucléaire sans sur-générateur (breeder), le prix de l'Uranium atteindrait un niveau concurrentiellement inacceptable avant l'an 2000. Un autre problème réside dans l'accumulation des déchets provenant sous diverses formes des usines thermiques, de l'industrie, des transports ou d'éléments radioactifs et leur assimilation par l'environnement. Enfin, la consommation des centrales thermiques en combustible fossile à raison de 3 millions de tonnes annuellement par GW électrique et l'évacuation des déchets radioactifs d'un nombre croissant de centrales nucléaires imposeront une charge de plus en plus lourde aux entreprises de transport en raison du volume à déplacer et des normes de sécurité à observer.

Devant la complexité des questions touchant à l'approvisionnement énergétique mondial et la diversité des données techniques rencontrées dans les articles spécialisés, le Centre de Recherches en Physique des Plasmas a entrepris la présente étude qui rassemble et compare les informations contenues dans les références mentionnées en fin de ce rapport. Cette recherche est motivée par la nécessité de situer la Fusion Thermonucléaire par rapport aux autres sources d'énergie, tant sur le plan des réserves, du rendement et de la pollution que sur celui des déchets radioactifs et des risques d'accidents.

L'appendice A, consacré principalement aux problèmes associés à l'irradiation, définit les doses-unité de rayonnement, indique les niveaux naturels, additionnels et maximum d'irradiation ainsi que les concentrations maximum autorisées de certains isotopes radioactifs, donne quelques informations sur les effets biologiques, compare les risques de certaines professions ou activités et mentionne les dangers potentiels des centrales nucléaires et thermiques. L'appendice B fournit la chaleur de combustion des diverses sources primaires d'énergie, précise l'abondance naturelle des combustibles nucléaires et contient une table des grandeurs fréquemment rencontrées dans la bibliographie.

Il a paru utile de grouper les références, non suivant leur ordre d'apparition dans le texte, mais selon leur importance:

- références générales traitant de l'approvisionnement énergétique dans son ensemble;
- références spécialisées abordant en détail un aspect des problèmes;
- références complémentaires fournissant des informations supplémentaires.

DEMANDE D'ENERGIE

Population

Comme toute prévision à long terme, c'est-à-dire à 30 ans et plus, les chiffres diffèrent selon les auteurs. La table 1 donne en millions d'habitants la population des diverses parties du globe en 1970 et les estimations pour l'an 2000. Dans 100 ans, la population mondiale pourrait atteindre 15 milliards d'habitants (30).

Consommation par habitant

La consommation^{*} actuelle et prévue par habitant est reportée dans la table 2 pour les principaux groupes de population. Les chiffres indiqués, tirés des références accompagnant le tableau, correspondent aux valeurs extrêmes rencontrées dans cette étude. Les autres références fournissent des valeurs qui se situent le plus souvent à mi-chemin entre ces limites (à noter toutefois que les références 7, 15, 47 et 51 mentionnent des valeurs inférieures d'un facteur 2,5 environ à la moyenne de la consommation électrique par habitant dans le Monde et aux USA en 1970). La consommation totale considère toutes les sources et toutes les formes d'utilisation de l'énergie, tandis que la consommation électrique représente la part de cette énergie (thermique) consacrée à la production d'électricité^{**}.

*Dans ce rapport, la consommation est exprimée sous forme de puissance (kW), c'est-à-dire par la quantité d'énergie (kWh) consommée durant l'année considérée divisée par le nombre d'heures dans une année (8760 heures/an).

** Dans cette étude, l'énergie et la puissance sont toujours exprimées sous forme thermique, en utilisant au besoin le rendement de conversion des centrales indiqué par les auteurs, ou à défaut les valeurs moyennes: centrales thermiques ~ 40 o/o, centrales nucléaires ~ 33 o/o.

La Figure 1, tirée de la référence 31 et complétée par les informations des références 4 et 46, fait apparaître une relation intéressante: lorsque la consommation totale d'un pays par habitant est reportée en fonction de son produit national brut, la plupart des pays se trouvent alors groupés autour d'une droite dont la pente correspond environ à 5.10^{-4} kW/Fr.S. Cette figure montre également que quelques pays sont placés à l'écart de la pente moyenne. Cela tient à leur économie orientée pour les uns vers l'industrie lourde, grosse consommatrice d'énergie, et pour les autres vers l'industrie légère de transformation. Le rendement économique de l'utilisation de l'énergie y joue aussi un rôle comme dans le cas des USA. La table 3, par exemple, donne en pourcents la répartition de la consommation de ce pays par habitant en 1970 en fonction des secteurs et des formes d'utilisation de l'énergie (30). Le contenu de la colonne "Autre" n'est pas spécifié mais comprend probablement le secteur agricole, les besoins propres des centrales thermiques et des raffineries, ainsi que les pertes de transmission.

Consommation globale

La consommation globale actuelle et prévue est reportée dans la table 4 pour les principaux groupes de population. De même que pour la table 2, les chiffres typiques se situent environ au centre des valeurs extrêmes fournies par les références indiquées. Les résultats de la table 4 s'obtiennent en principe en multipliant ceux de la table 2 par les populations de la table 1 (en remarquant toutefois que les chiffres des tables 2 et 4 ne sont pas toujours tirés des mêmes références).

Répartition de la consommation par sources

La consommation totale des divers groupes de population est répartie dans la table 5 en fonction des sources d'énergie primaires, soit le charbon, les huiles brutes et le gaz liquéfié, le gaz naturel* et l'énergie élec-

* En abrégé: charbon, huiles, gaz

trique d'origine hydraulique et nucléaire. Parmi les autres sources primaires, l'électricité d'origine géothermique, incluse dans l'énergie hydroélectrique, ne représentait en 1969 qu'une fraction généralement négligeable de celle-ci: Monde 0,43 o/o, USA 0,24 o/o, Italie 6,2 o/o, Iceland 0,25 o/o, Japon 0,37 o/o, Nouvelle Zélande 10,5 o/o (7). Quant à l'énergie provenant de la combustion du bois, elle n'est pas explicitement indiquée mais représente pour la Suisse 1,6 o/o en 1970 (36, 48, 49, 51).

L'électricité provenant aussi bien des combustibles fossiles que des ressources hydroélectriques et nucléaires, la colonne supplémentaire "Electricité" représente la fraction de la consommation totale (thermique) consacrée à sa production. Enfin, la construction de centrales nucléaires passant à l'heure actuelle par une phase très rapide de croissance, leur part dans la consommation totale ("Nucl") et dans la consommation électrique ("Nucl/Elect") dépend fortement de la date de l'année à laquelle la statistique a été établie.

Répartition de la consommation par sources et par secteurs

Certains auteurs précisent la contribution en énergie des sources primaires aux divers secteurs de consommation. Ces derniers comprennent généralement l'industrie et le secteur agricole, le commerce et les résidences, les transports. Quelques auteurs excluent des secteurs précités et considèrent comme postes supplémentaires, d'une part l'énergie nécessaire à la production d'électricité, d'autre part les pertes dans les centrales électriques et lignes de transmission, les besoins propres aux usines à gaz, aux raffineries et au repompage des usines hydroélectriques, l'utilisation non-énergétique des combustibles fossiles ou l'énergie (principalement solaire) fournie à l'homme sous forme de nourriture. Ces secteurs, souvent non spécifiés, apparaissent sous la dénomination "Autre". Ils peuvent être approximativement chiffrés pour les USA et la Suisse (1970) en o/o comme suit:

	USA	Suisse
production d'électricité (37, 39, 46, 48)	20,7 - 24,7	15,3 - 17,9
pertes (centrales et lignes) (44, 46)	~ 9	9,1
besoins propres (centrales et raffi- neries), repompage (46)		2,7
utilisation non-énergétique des combustibles fossiles (4, 30)	7 - 11	
nourriture (4)	4,2	

Du fait de ces postes supplémentaires, la part des secteurs principaux en est diminuée d'autant et il devient difficile de comparer entre elles les statistiques des différentes références. Les tables 6, 7, 8 et 9 répartissent en pourcents la consommation totale aux USA et en Suisse pour les années 1970 et 2000 entre les diverses sources d'énergie et les secteurs d'utilisation.

Pour la Suisse, les besoins propres et les pertes ont été répartis dans les secteurs principaux proportionnellement à la part de ces derniers dans la consommation totale, tandis que l'électricité provenant des centrales à combustibles fossiles a été ajoutée à la consommation d'huiles à raison de 5,5 o/o de la puissance installée en 1970 et 3 o/o en 2000 (46).

Croissance

Les taux de croissance annuels de la consommation globale, de la consommation sous forme d'électricité et de la population sont donnés dans la table 10 pour les divers groupes de population. La croissance (exponentielle) est calculée sur les années 1960-1970, durant l'année 1970 (marquée par x) et sur la période 1970-2000. Les chiffres indiqués par la référence 7 (Nations Unies, 1966-1969) donne des valeurs systématiquement inférieures à celles des autres références. Semblablement, les tables 11 et 12 répartissent le taux de croissance annuel de la consommation selon les sources primaires d'énergie pour les périodes 1960-1970 et 1970-2000.

Les chiffres des tables 10, 11 et 12, calculés à partir d'un nombre relativement restreint de références, doivent être interprétés comme la tendance actuelle et prévisible de la consommation et non pris dans leurs valeurs absolues.

RESERVES

Gisements

Le charbon, les huiles et le gaz liquéfié, le gaz naturel, l'énergie électrique d'origine hydraulique, nucléaire ou solaire constituent les principales sources d'énergie dont l'homme peut disposer. Globalement, ces sources représentent une réserve d'énergie considérable, voire même fabuleuse. Les difficultés naissent lorsqu'il s'agit de les estimer puis de les exploiter. C'est en premier lieu un problème d'ordre technique, mais aussi économique et politique.

S'il est relativement aisé d'estimer les ressources en charbon parce que les filons sont continus sur de larges surfaces, il n'en va pas de même pour les huiles brutes et le gaz qui se présentent sous forme de poches de volume limité, réparties sur de vastes territoires et à des profondeurs très variables. D'après des statistiques établies aux USA et apparemment valables pour le monde, les découvertes de gisements importants (d'au moins $1,4 \cdot 10^5$ tonnes d'huiles ou $1,65 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ de gaz) sont de plus en plus rares (1, 2): s'il suffisait en 1945 de 26 forages dans de nouvelles régions pétrolières pour découvrir un gisement important, il en faut plus de 65 aujourd'hui; exprimé d'une autre façon, chaque mètre de forages exploratoires permettait avant la dernière guerre de découvrir 125 tonnes d'huiles contre 16 actuellement, alors même que cette période coïncide avec l'effort de recherches le plus intensif et le plus techniquement avancé.

Les découvertes de gaz naturel sont liées à celles du pétrole et ceci dans un rapport relativement constant d'environ 1350 m^3 de gaz par tonne d'huile brute. Ce rapport a tendance à augmenter jusqu'à 1550 m^3 dans les forages de grande profondeur.

En ce qui concerne les gaz liquides, sous-produits de faible densité provenant de la production de gaz naturel, ils sont reliés à ce dernier dans la proportion d'environ $1,23 \cdot 10^{-4}$ tonnes de gaz liquéfié par m^3 de gaz naturel.

Les goudrons et le kérosène solide contenus dans les sables bitumeux (Tar-Sand) ou les argiles schisteux (Oil Shales) ne sont pour la plupart pas encore exploités, de sorte que les réserves qu'ils constituent sont mal connues et certainement sous-estimées.

L'Uranium est un élément relativement rare. Son extraction sous forme d'oxyde (U_3O_8) tend à devenir plus coûteuse. Pour l'Uranium bon marché (≤ 8 \$/lb), le rendement a passé aux USA de 12 kg par mètre de forage au milieu des années 60 à 5,5 kg/m en 1969. Les gisements connus contiennent environ 150 gr de minerai d'Uranium ou de Thorium par m^3 de roches.

Le Deutérium est présent en très grande quantité dans l'eau de mer. Son abondance par rapport à l'hydrogène est de 1/6500. Son extraction est techniquement aisée, mais s'accompagne d'une importante consommation d'énergie. Le Lithium, en revanche, est principalement tiré sous forme d'oxyde (Li_2O) des couches rares de roches ignées. L'abondance du Li^6 est de 3,42 o/o dans l'oxyde et de 7,42 o/o dans le Lithium naturel. Les océans toutefois constituent une réserve importante de ce métal.

Les termes généralement utilisés par les auteurs pour qualifier les réserves sont: a) connues, prouvées, assurées; b) probables, estimées, économiques, à bas prix ou deux fois le prix actuel; c) additionnelles, futures, totales, ultimes, à faible teneur en soufre (fossiles), théoriques (Uranium ou Deutérium dans les océans), originales ou "minables" (charbon). A part ce dernier terme qui correspond à 50 o/o du charbon présent dans la croûte terrestre et situé à moins de 1,8 km de profondeur dans des filons d'au moins 36 cm d'épaisseur, aucun autre qualificatif n'est défini par les divers auteurs. Dans ce rapport, les deux premières listes seront considérées comme réserves prouvées, la dernière comme réserves futures. En particulier, les réserves connues d'Uranium à prix élevé (supérieur à 15 \$/lb, 1 lb = 0,4536 kg) et de Thorium, ainsi que celles de Deutérium et de Lithium, doivent être classées comme futures puisque leur exploitation ne débutera que lorsque les réacteurs à haute température ou les sur-

générateurs à fission et les réacteurs thermonucléaires à fusion seront commercialisés.

Il est admis qu'aucune contrainte politique ne limitera la répartition équitable des réserves mondiales selon les besoins de chaque pays. En conséquence, les réserves indiquées et leur durée s'appliquent à l'ensemble du monde; l'inexactitude d'une telle hypothèse pourrait avoir de graves répercussions économiques pour certaines nations !

Durée théorique d'une réserve

Il existe une méthode permettant de prévoir l'époque à laquelle une réserve sera épuisée. Elle fait appel aux trois paramètres suivants: les réserves connues et futures du combustible considéré, le taux de croissance actuel de sa production, le coût et les difficultés de nouvelles découvertes ou de leur extraction. Il en résulte une courbe "production annuelle-temps" en forme de cloche qui part de zéro, croît et passe par un ou plusieurs maxima en fonction du prix et de la demande du produit, puis décroît au fur et à mesure que la réserve s'amenuise. La surface délimitée par cette courbe ne peut être supérieure aux réserves initiales. La durée de la réserve est alors définie par la période située entre les premiers et les derniers 10 o/o de la surface. Des facteurs économiques tels que la concurrence d'autres sources d'énergie peuvent modifier l'amplitude et le temps des maxima sans changer toutefois l'allure générale de la courbe.

K. Hubbert (1, 2), l'auteur de la méthode, détermine ainsi les cycles du charbon et des huiles. Il montre que le 80 o/o des réserves situés entre le début de leur exploitation et leur quasi-épuisement s'étend de l'an 2000 à 2300 ou 2400 pour le charbon et de 1968 à 2028 environ pour les huiles, tandis que leur maximum se placent approximativement en l'an 2130 et 1995 respectivement. A l'heure actuelle, ces réserves sont consommées à raison de 1,8 à 13,6 o/o.

Durée prévue des réserves connues et futures

La table 13 indique la durée des réserves mondiales en combustibles fossiles et nucléaires. Ces chiffres sont explicitement mentionnés dans les références citées en marge. Les bases ayant servi à leur estimation ne sont malheureusement pas connues. Les prévisions concernant les combustibles fossiles sont assez cohérentes; en revanche, celles s'appliquant aux combustibles nucléaires divergent passablement suivant les auteurs et ne doivent être retenues que comme un ordre de grandeur. La table 13 montre clairement que toutes les réserves seront épuisées dans un temps dramatiquement court si aucune restriction imposée ou librement consentie ou un meilleur emploi de leur contenu énergétique n'intervient d'ici là. Dans cette perspective, la commercialisation des surgénérateurs à fission (breeder) est prévue au plus tôt pour 1985 (15, 18, 40), celle des réacteurs thermonucléaires pour la fin du siècle (19, 20, 60, 71).

Pénurie

Les indications de la table 13 expriment les résultats de la prospection dans l'ensemble du monde. Elles ne tiennent par conséquent pas compte des conditions locales et économiques, telles que répartition des gisements, capacité des moyens de production et des réseaux de distribution, coût du combustible raffiné, nombre d'usines d'enrichissement de l'Uranium, délais dans la construction de nouvelles centrales, saturation des ressources hydrauliques, etc. Ces contraintes sont à l'origine des pénuries que la presse annonce de plus en plus fréquemment pour un avenir très rapproché: dès 1971 (électricité, Côte Est), 1978 (Uranium enrichi), 1980 (huiles), 1985 (gaz) aux USA (38, 49, 53); 1975-1978 (électricité) en Suisse (50,51).

Réserves fossiles

Les réserves mondiales de charbon, d'huiles et de gaz, exprimées en kW-an, sont reportées dans la table 14. Les indications mentionnées par les autres références tombent à l'intérieur des valeurs extrêmes indiquées. L'ensemble de ces réserves fossiles apparaît également dans cette table.

Réerves d'Uranium et de Thorium

L' U^{235} est le seul élément fissible existant dans la nature. Un élément fissible se désintègre grâce à sa section efficace de fission plus grande que celle d'absorption et lors de ce processus, libère de l'énergie ainsi que deux à trois neutrons utiles à l'entretien d'une réaction en chaîne. D'autres éléments fissibles, tels que l' U^{233} et le Pu^{239} , inexistants à l'état naturel, sont créés dans les réacteurs par conversion des éléments fertiles et abondants Th^{232} et U^{238} , qui sont alors brûlés dans la réaction. Lorsque le facteur de conversion est inférieur à 1 (0,6 à 0,8), les réacteurs sont appelés convertisseurs. Ce sont les réacteurs thermiques modérés à l'eau pressurisée (PWR) ou bouillante (BWR) et les réacteurs à haute température modérés au graphite et réfrigérés au gaz (HTGR). Ils sont basés sur le cycle de l' U^{235} enrichi avec, dans le dernier, adjonction de Th^{232} . Lorsque le facteur de conversion est supérieur à 1 (1,06 à 1,5), les réacteurs sont appelés surgénérateurs (breeder). Ce sont principalement les réacteurs rapides réfrigérés au sodium liquide (LMFBR) ou au gaz (GCFBR) et le réacteur thermique réfrigéré aux sels fondus (MSBR). Ils fonctionnent sur le cycle $Pu^{239} - U^{238}$ ou $U^{233} - Th^{232}$ (15, 16, 57).

Dans les réacteurs modérés à l'eau (généralement eau légère (LWR) par opposition à l'eau lourde), l'énergie contenue dans l'Uranium naturel n'est exploitée qu'à moins de 2 o/o, tandis que dans les surgénérateurs il peut être recyclé jusqu'à 70 o/o (16, 62). Comme le minerai d'Uranium ne contient que 0,7 o/o d' U^{235} contre 99,3 o/o d' U^{238} , il en résulte que les surgénérateurs utiliseront les réserves d'une manière beaucoup plus rationnelle que les convertisseurs actuels.

Les réserves mondiales d'Uranium sont réparties dans la table 15 selon le prix d'extraction du minerai ($\$/lb U_3O_8$). Ces réserves sont inégalement réparties entre l'Amérique du Nord (2/3) et l'Union Sud-africaine (1/3) pour l'Uranium au prix actuel et approximativement par moitié entre l'Amérique du Nord et l'Europe pour le minerai à 15 $\$/lb$. Les réserves futures sont pour la plupart concentrées sur le continent nord-américain (2). Les océans recéleraient $4 \cdot 10^9$ t d' U_3O_8 (5).

Il n'existe que peu d'informations sur les réserves mondiales de Thorium. Aux USA, le tonnage de ThO_2 tend à dépasser celui de $1'U_3O_8$ à partir d'un prix d'extraction supérieur à 30-50 \$/lb (20).

La table 15 donne en kW-an la quantité d'énergie qui pourrait être tirée des réserves mondiales d'Uranium et de Thorium par l'emploi exclusif de convertisseurs (LWR) ou de surgénérateurs (breeder). Ces chiffres sont explicitement mentionnés par les auteurs cités en référence. Les tonnages et énergies indiqués ne sont cependant pas en accord avec le contenu énergétique expérimental de ~ 3 kW-an/gr U^{235} pour les réacteurs à eau légère actuels et théorique de $\sim 2,2$ kW-an/gr U^{238} pour les surgénérateurs.

Le taux de croissance nucléaire de la table 12 et les réserves d'Uranium de la table 15 montrent que l'augmentation de la demande en électricité ne pourra être satisfaite d'une façon concurrentielle par les centrales du type actuel au-delà d'une vingtaine d'années et qu'il est impératif que les surgénérateurs prennent la relève après 1985 (1).

Réserves de Deutérium et de Lithium

Les réacteurs basés sur la fusion thermonucléaire utiliseront au début la réaction Deutérium-Tritium. Si le Deutérium est abondant dans l'eau de mer (1 atome D/6500 atomes H) (66), le Tritium en revanche est pratiquement inexistant dans la nature (1 atome T/ 10^{18} atomes H) (75). Il devra donc être créé dans un manteau de Lithium entourant le plasma thermonucléaire. Selon les machines, un facteur de conversion de 1,02 à 1,2 ou plus est probablement réalisable (breeding) (65, 68). L'isotope Li^6 nécessaire à cette régénération n'est présent dans le Lithium naturel (Li^7) qu'à raison de 7,42 o/o (1). L'énergie produite par les premières générations de réacteurs à fusion sera donc limitée par la disponibilité du Lithium. Dans une seconde phase, la réaction Deutérium-Deutérium qui ne fait pas appel au Lithium pourra vraisemblablement être exploitée. Cette source d'énergie sera pratiquement inépuisable.

La table 16 indique le tonnage et l'énergie disponible dans les réserves de Li^6 , ainsi que l'énergie qui pourrait être obtenue en exploitant tout le Deutérium contenu dans les océans ($1,5 \cdot 10^{18} \text{ m}^3$). Les réserves représentées par la réaction D-T correspondent au double des ressources mondiales en combustibles fossiles.

Flux naturels

L'exploitation des sources naturelles et continues telles que l'énergie hydraulique, géothermique, marémotrice, etc. est périodiquement reconsidérée. Jusqu'ici aucune méthode technique n'a pu être conçue pour capter ces flux d'une façon économique ou avec un rendement suffisamment élevé.

Energie solaire (1, 2, 3, 6, 26, 29): La puissance totale rayonnée par le soleil est environ de $3,8 \cdot 10^{23} \text{ kW}$. De ce flux, le disque terrestre intercepte $178 \cdot 10^{12} \text{ kW}$, dont $62 \cdot 10^{12} \text{ kW}$ (35 o/o) sont réfléchis par la haute atmosphère, $76 \cdot 10^{12} \text{ kW}$ (43 o/o) sont absorbés par la Terre et convertis en chaleur, $40 \cdot 10^{12} \text{ kW}$ (22 o/o) sont dissipés sous forme d'évaporation et de précipitations et $0,4 \cdot 10^{12} \text{ kW}$ (~ 0 o/o) sont liés aux vents, courants et phénomènes de photosynthèse. Des $116 \cdot 10^{12} \text{ kW}$ nets qui frappent la surface terrestre, seuls 24 à $30 \cdot 10^{12} \text{ kW}$ (environ 25 o/o) atteignent les continents (29,2 o/o de la surface du globe) ce qui correspond en moyenne à $0,22 \text{ kW/m}^2$ (au maximum 1 kW/m^2 lorsque le soleil est au zénith) et à $1,39 \text{ kW/m}^2$ en dehors de l'atmosphère terrestre. Si les régions désertiques sont assez vastes et ensoleillées pour couvrir largement la demande mondiale en électricité et si les rendements calculés oscillent entre 10 et 30 o/o, les investissements pour capter, stocker et transporter cette puissance intermittente et localisée sont actuellement hors de proportion. Il en irait de même pour la mise en orbite de gigantesques panneaux solaires et de stations réémettrices d'énergie par l'intermédiaire de micro-ondes ou de lasers.

Energie hydraulique (2, 65): De très vastes bassins restent à exploiter dans les régions du monde précisément les moins industrialisées. Leur réserve potentielle s'élève à $1,7 - 3 \cdot 10^9$ kW. Les aménagements hydro-électriques actuels représentent 8,5 o/o de cette puissance.

Energie géothermique (1, 2, 3, 6): A raison de 63 mW/m^2 , le flux de chaleur provenant de l'énergie thermique, de désintégrations nucléaires et de la gravitation à l'intérieur de la terre atteint sur l'ensemble de sa surface ($5,1 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$) une puissance de $3,2 \cdot 10^{10}$ kW. Les sites exploitables et de contenu énergétique limité sont les régions de volcans et de geysers. Leurs réserves représentent $1,2 \cdot 10^{10}$ kW-an ou $2,4 \cdot 10^8$ kW si elles sont épuisées en 50 ans. Le rendement électrique des installations déjà existantes en Italie, aux USA et en Nouvelle-Zélande atteint environ 25 o/o.

Energie marémotrice (1, 2, 3): Les marées et courants induits par la lune représentent $1 - 3 \cdot 10^9$ kW. Comme pour l'énergie solaire, les hautes et basses marées ne sont exploitables qu'en des lieux propices et pendant de brèves périodes de la journée. L'ensemble des sites potentiellement intéressants représente environ $6,4 \cdot 10^7$ kW, soit 2 o/o des réserves potentielles hydrauliques. Le rendement énergétique calculé par rapport au cycle complet de remplissage et de vidange du bassin est de 8 à 20 o/o, bien qu'apparemment l'installation française de la Rance ait presque atteint 25 o/o.

Autres énergies (3): Les autres réserves continuellement renouvelées provenant de la photosynthèse ($8 \cdot 10^9$ kW), du bois ($3 \cdot 10^9$ kW), des déchets agricoles ($2 \cdot 10^9$ kW), du vent ($1 \cdot 10^8$ kW), etc. représentent globalement pour le monde une puissance maximum de $13,6 \cdot 10^9$ kW.

Si ces divers flux peuvent être localement et partiellement exploités, un effort considérable de recherches doit encore être entrepris avant que la technologie les rende commercialement compétitifs.

DECHETS

Origines

Quelle que soit la source d'énergie ou la forme de son utilisation, sa mise en valeur sous une forme consommable conduit obligatoirement à la production de déchets. Ne considérant que les déchets en relation avec la production d'énergie, ceux-ci sont les terrils et boues d'extraction, les composés chimiques gazeux, scories et poussières lors de la combustion des combustibles fossiles, la production d'éléments radioactifs dans les centrales et les usines de retraitement nucléaires, les pertes calorifiques lors de la production d'électricité et de sa distribution, les déchets industriels, ménagers, municipaux et agricoles après utilisation de l'énergie pour la production de biens et aliments consommables. Ces déchets peuvent agir sur l'environnement, la santé et le climat. Leur élimination, leur destruction ou leur récupération partielles absorbent une partie de l'énergie qui les a produits.

Déchets non-nucléaires

Les déchets non-nucléaires proviennent principalement de l'extraction et de la combustion des combustibles fossiles, de leur transformation en énergie électrique et du rebut de la société. Les indications rapportées ci-après sont le résultat d'études entreprises aux USA. Elles sont caractéristiques d'un pays fortement industrialisé et consommant une grande quantité d'électricité par tête d'habitant. Mises à part les données concernant les centrales thermiques qui sont les mêmes partout, ces informations ne fournissent qu'un ordre de grandeur quant aux déchets résultant de l'utilisation de l'énergie.

Une centrale thermique de 1000 MW (e) exige environ 10'000 tonnes par jour de charbon ou d'huile, soit 2,5 à 3 millions de tonnes par an. Ces chiffres correspondent à un facteur de travail (load factor) de 0,7 à 0,8 (55, 56, 60, 61). Avec un rendement thermique moyen de 38,5 o/o et suivant la qualité de combustible utilisé, une centrale thermique doit donc être alimentée en combustible fossile à raison de 960 à 1390 kg/kW-an (thermique).

Pour extraire les $530 \cdot 10^6$ t de charbon consommées aux USA en 1970, il a fallu accumuler plus de $13 \cdot 10^6$ t de déchets au voisinage des mines, plus de $90 \cdot 10^6$ t aux usines de préparation et arracher environ 10^9 t de roches, graviers et sables des mines à ciel ouvert (39). Cela représente globalement pour le charbon 2400 kg/kW-an.

La combustion des produits fossiles provoque le rejet dans l'atmosphère de composés chimiques et de poussières et accumule au sol des scories. La table 17 donne le tonnage annuel des composés du carbone, du soufre et de l'azote et celui des cendres et scories produits aux USA en 1970 par la combustion des produits fossiles en général et par les centrales électriques en particulier. Ce tonnage est également converti en poids par unité d'énergie globalement consommée ou nécessaire à la production d'électricité.

A titre d'information et selon le seul auteur qui les indique (5), le tonnage annuel que représentent ces émanations aux USA en 1970 est réparti dans la table 18 en fonction des secteurs d'utilisation de l'énergie. Le poids par unité d'énergie consommée est calculé à partir de la consommation globale moyenne aux USA et de sa répartition dans les secteurs considérés (voir tables 4 et 6).

De plus, une centrale thermique rejette dans l'atmosphère ou dans les bassins et cours d'eau avoisinants environ 1,6 kW-an par kW-an électrique produit (rendement 38,5 o/o). Cette perte de chaleur est dégagée localement par des unités de 300 à 800 MW(e) actuellement qui augmenteront à 1000 MW(e) et plus par la suite. Pour l'ensemble du monde, la chaleur ainsi perdue se chiffre entre 0,68 et $1 \cdot 10^9$ kW-an en 1970 et atteindra probablement 5 à $8,2 \cdot 10^9$ kW-an en l'an 2000 (29, 65). Le refroidissement des centrales électriques représente donc une menace pour les eaux de surface et les estuaires par suite de l'action combinée d'une élévation importante de leur température et d'une pollution chimique. A titre d'exemple, la température du Rhin atteindra 35°C en 1985 si aucune précaution n'est prise pour le refroidissement des usines thermiques et des centrales nucléaires prévues le long de son cours (46). Inversement, l'implantation de centrales en bordure des océans ou sur les socles continentaux peut apporter une solution aux pays côtiers. La faune marine pourrait même en bénéficier (3).

A l'échelle mondiale, la combustion des produits fossiles a conduit au siècle dernier à une augmentation de la concentration en CO_2 de 290 à 320 ppm dans les couches supérieures de l'atmosphère. Les prévisions jusqu'en l'an 2000 indiquent un accroissement de 18 à 25 o/o (400 ppm). Il pourrait en résulter une diminution du rayonnement terrestre dans l'infrarouge due à l'effet filtrant du CO_2 (effet de serre) et une augmentation de la température en surface de 0,05 à peut-être 1°C (3, 5, 33, 40). La présence dans l'atmosphère de poussières d'origine industrielle ou volcanique de même qu'une pellicule de mazout à la surface des océans pourrait compenser l'effet de serre par une augmentation générale de la réflectivité diminuant l'influx solaire d'une part et le refroidissement des océans par rayonnement d'autre part (5).

En dernier lieu, la consommation d'énergie produit des déchets industriels, ménagers et municipaux. Dans ces derniers, le papier, les détritrus de jardins et des rues, le plastique et les pneus représentent aux USA 64 o/o, les poubelles et les graisses 12 o/o, le verre, le métal et les cendres 24 o/o (20). La table 19 est une tentative d'exprimer ces déchets par unité d'énergie consommée dans les divers secteurs d'utilisation aux USA en 1970. Dans cette table, la répartition de la puissance inclut la consommation d'énergie électrique (4, 20, 29, 40, 43). Pour comparaison, les déchets agricoles et animaux (fumier) se chiffrent chacun à environ $500 \cdot 10^6$ t/an (20, 29).

Déchets nucléaires

Les déchets en relation avec l'énergie nucléaire comportent d'une part les roches accumulées par l'extraction du minerai (U_3O_8 , ThO_2 , Li_2O) et les pertes calorifiques dues au rendement des centrales nucléaires (LWR 30 à 35 o/o, HTGR et surgénérateur 40 à 43 o/o, Fusion 40 à 60 o/o) (16, 18, 20, 21, 60, 72) et d'autre part l'ensemble des isotopes et des éléments devenus radioactifs, créés dans les réacteurs et retrouvés en quasi-totalité aux usines de retraitement. La chaleur dégagée par la radioactivité des isotopes dans le combustible usagé (jusqu'à 100 kW pour les LWR, respectivement 270 kW pour les LMFBR, par tonne de combustible dans le réacteur au déchargement), bien que posant des problèmes techniques d'évacuation, n'est pas considérée ici comme déchet.

Réacteurs à fission: Le calcul de la radioactivité engendrée annuellement ou accumulée par un réacteur à fission est une affaire de spécialistes. Elle dépend des caractéristiques du réacteur telles que son type (LWR, surgénérateur), sa puissance, sa charge et l'enrichissement de son combustible, son énergie spécifique (Burnup, MW-jour/tonne), l'intervalle et la fraction de sa recharge. Elle varie avec les procédés de retraitement, en particulier avec la période mise à profit pour la décroissance de la radioactivité entre l'enlèvement du combustible usagé du réacteur et son retraitement ainsi que du temps écoulé entre la production de la puissance et celle des déchets. Les chiffres indiqués plus loin proviennent pour une bonne part de l'étude très détaillée concernant les usines de retraitement mentionnée sous référence 18. Cette étude base ses résultats sur un réacteur à eau pressurisée (LWR) et sur un surgénérateur à métal liquide (LMFBR), tous deux de 1000 MW (électrique), dont les caractéristiques sont présentées dans la table 20. Les chiffres entre parenthèses tiennent compte d'un facteur de charge de 0,85 pour la puissance spécifique des réacteurs et d'une homogénéisation des charges (coeur et manteaux) avant retraitement pour l'énergie spécifique du surgénérateur.

Un réacteur du type LWR consomme environ 0,3 à 0,44 gr d'Uranium²³⁵ par kW-an (54, 55) et un surgénérateur environ 0,39 à 0,49 gr d'Uranium²³⁸ par kW-an (2, 16), soit 0,82 à 1,18 et 1,07 à 1,36 gr/MW-jour (th) respectivement. Cette très faible consommation associée à un renouvellement fractionné de la charge conduit à un nombre restreint de transports entre l'usine fabriquant les éléments, le réacteur et le centre de retraitement. Le nombre de fûts transportés annuellement aux USA entre les réacteurs et les centres de retraitement passera de 30 en 1970 à 9500 en l'an 2000, chaque fût contenant 3 tonnes (LWR) ou 1,2 tonne (LMFBR) de combustible usagé (18). Les dangers de tels mouvements résident dans une panne du système refroidissant les fûts, dans les accidents (USA: $2,3/10^6$ km-camions ou $1,8/10^6$ km-wagons) conduisant dans 5 à 10 o/o des cas à des dommages permanents, dans des détournements ou dans de fausses destinations (USA: 3 en 1969) (13, 18).

Le combustible dans les centrales nucléaires est contenu dans une succession d'enceintes suffisamment étanches pour que les gaz radioactifs qui s'en échappent (principalement Krypton⁸⁵, Tritium, Iode¹³¹) n'ajoutent pas plus de 1 à 5 o/o à l'irradiation naturelle de la population voisine

(5, 14, 15, 54, 61). Il est utile de rappeler ici que la radioactivité qui fuit d'une centrale nucléaire est dans bien des cas comparable ou même de beaucoup inférieure à celle contenue dans les émanations et les scories d'une centrale thermique fonctionnant au charbon (5, 46).

C'est à l'usine de retraitement du combustible usagé que la quasi-totalité des produits de fission réapparaissent: les gaines et leur contenu sont ouverts et dissouts à l'acide nitrique, l'Uranium et le Plutonium récupérés par divers procédés d'extraction, les dissolvants retraités, tandis que les déchets solides, liquides ou gazeux qui en résultent sont concentrés, évaporés ou filtrés avant d'être entreposés temporairement en sous-sol ou relachés dans l'atmosphère (15, 16, 18, 57).

Afin de limiter les fuites, le bâtiment, les cellules blindées de retraitement et leurs équipements travaillent en dépression l'un par rapport à l'autre. Certains isotopes sont l'objet de précautions particulières. L'Iode¹³¹ gazeux peut se concentrer dans la glande thyroïde des enfants par l'intermédiaire du lait; il est donc retenu par réactions chimiques et épuration jusqu'à plus de 99,5 o/o, tandis que sa demi-vie de 8 jours environ contribue à réduire la radioactivité à une dose admissible au moment où il atteindra l'enfant. Le Strontium⁹⁰ et le Caesium¹³⁷, d'une demi-vie de 30 ans, se concentrent sur les cultures et dans les poissons et par ces aliments peuvent se fixer dans les os; la pratique consiste à retenir et solidifier le 95 o/o de ces éléments et à concentrer le reste par évaporation dans des fûts de stockage temporaire. Le Tritium gazeux présent dans le combustible se combine presque entièrement à l'eau au cours du retraitement; une séparation n'étant plus possible et une dilution jusqu'à une dose potable n'étant pas économique, l'eau contaminée est distillée et le Tritium dispersé par la cheminée dans l'atmosphère*. Les conséquences de ces fuites contrôlées se manifestent localement aux alentours de l'usine de retraitement. A l'avenir, l'augmentation de la capacité de retraitement (10 à 20 t/jour) et la plus grande

* L'article cité sous référence 23 étudie d'une façon très complète les sources, le cheminement et l'impact du Tritium sur l'environnement.

radioactivité spécifique du combustible provenant des surgénérateurs nécessiteront des systèmes de rétention beaucoup plus efficaces.

Le premier raffinage retient plus de 99,9 o/o des produits de fission non-volatiles contenus dans le combustible usagé. Les déchets concentrés qui en résultent (high-level wastes; $1,65 \cdot 10^{-2}$ lit/kW-an, 220 Ci/lit) apparaissent dans leur solution acide avec une radioactivité jusqu'à 10^{10} fois supérieure à la concentration permise maximum (MPC: Maximum Permissible Concentration). Ils sont contenus dans des fûts d'acier équipés de systèmes complexes de refroidissement et ils sont stockés temporairement en sous-sol dans des caveaux de béton. Un total de $360'000 \text{ m}^3$ est ainsi retenu aux USA dans 200 fûts environ, dont 15 ont présenté des défauts. La seule solution susceptible d'assurer la sécurité nécessaire lors des manipulations ou au cours du stockage de ces déchets hautement radioactifs est leur solidification immédiate: cette technique, actuellement à un stade expérimental avancé, fixe ces déchets sous une forme solide, de faible volume et pratiquement insoluble dans l'eau.

Le produit des deuxième et troisième raffinages, ainsi que les éléments provenant de la décontamination des équipements, de la purification des solvants et des épurateurs (intermediate - level wastes; $1 - 2,5 \cdot 10^{-2}$ lit/kW-an, $2,2 \cdot 10^{-2}$ Ci/lit) apparaissent en quantité suffisamment faible et peu radioactive pour être stockés dans des fûts en sous-sol ou, après une période de décroissance adéquate, déchargés dans les eaux côtières. La radioactivité de ces isotopes se situe entre 10^4 et 10^6 fois leur MPC.

Les déchets dont la radioactivité ne dépasse pas 10 à 10^4 fois le MPC correspondant à chacun des isotopes et dont le volume est important (low-level wastes; $0,5$ lit/kW-an, $8 - 100 \cdot 10^{-6}$ Ci/lit) sont éliminés dans le sol au moyen de bassins ou de tranchées, ou dans les rivières et la mer après décontamination appropriée.

Les gaines du combustible (LWR: Zircaloy, Inconel; LMFBR: acier inox) irradiées dans le réacteur conduisent à des produits d'activation fortement radioactifs. Chimiquement et physiquement très différents des produits de fission, ces déchets sont traités séparément, soit par solution, soit par arrachement mécanique (environ $0,1$ lit/kW-an; ou LWR: $0,65 \cdot 10^{-6}$, LMFBR:

2,7 10^{-6} m³/kW-an). Ils sont stockés temporairement en fûts sous-terrain ou sous l'eau.

Enfin, le matériel courant ayant séjourné à proximité d'éléments radioactifs, tels que vêtements, emballages, équipements, verre cassé, etc. représente une grande quantité de déchets solides ($62 \cdot 10^{-6}$ m³/kW-an) qui peuvent être incinérés, compactés ou enrobés, puis enterrés sans danger en des endroits hydrologiquement favorables.

En ce qui concerne l'élimination définitive des déchets hautement et moyennement radioactifs, le choix d'une solution pleinement satisfaisante n'a pas encore été arrêté (13, 26, 49, 53). Par sa résistance aux contraintes mécaniques, son excellente conductibilité thermique et sa plasticité, le sel des mines désaffectées pourrait être un cimetière idéal. Cependant, la solidité des voûtes sous l'effet de la chaleur (jusqu'à 930°C) (59) entretenue par la radioactivité accumulée dans les déchets, le risque de corrosion des fûts et dans certains cas l'inondation de la mine posent encore des problèmes. De nombreuses autres formations géologiques, telles que dépôts calcaires, couches d'argile, bancs de granite, etc. seraient susceptibles d'accueillir les déchets très radioactifs, mais il sera auparavant nécessaire de vérifier les effets possibles des radiations et de la chaleur sur leur stabilité et d'établir l'absence de toute migration d'eau à l'intérieur de ces formations.

La table 21 donne la radioactivité et le poids des déchets nucléaires rapportés à l'unité d'énergie (kW-an) délivrée par le réacteur à eau légère et le surgénérateur décrit dans la table 20. Ces déchets sont présentés de trois façons différentes: selon le danger qu'ils représentent par leur toxicité ou par leur concentration due à des cheminements naturels; selon leur groupement en produits de fission (poids 3 à 167), actinides (produits de fission lourds, poids 228 à 244, susceptibles de se fissionner comme le Thorium, l'Uranium, le Plutonium), produits d'activation (poids 3 à 125, tels que gaines et entretoises); ou encore selon leur concentration permise maximum (high-, intermediate-, low-level). Ces résultats sont valables pour un retraitement des combustibles usagés après 150 jours, respectivement 30 jours, et sont tirés des tables de la référence 18 donnant l'évolution de la radioactivité et du poids de chaque isotope en fonction du temps.

Les tables 22a) et b) estiment jusqu'en l'an 2000 la puissance nucléaire installée et produite, la quantité de combustible retraité, le volume, le poids et l'activité des déchets prévus aux USA et dans le Monde libre, d'après la référence 18 (analyse datant du 11 avril 1968).

Les indications des tables 22 sont obtenues en tenant compte des hypothèses suivantes: l'accroissement de la puissance installée aux USA à des fins non-militaires est assuré jusqu'en 1985 par les réacteurs du type LWR. La puissance fournie par les surgénérateurs du type LMFBR, commercialisés à partir de 1980, rejoint celle des LWR en 1993 et prédomine par la suite. Ces réacteurs correspondent à ceux décrits dans la table 20. La puissance installée dans le Monde libre en l'an 2000 représente le double de celle des USA à cette époque. Cette puissance est fournie par des réacteurs moins puissants, irradiés en moyenne à 20'000 MW-jour/tonne sous une puissance spécifique de 25 MW/tonne, avec un rendement thermique de 0,31 et un facteur de charge de 0,8 jusqu'en 1980, puis de 0,7 jusqu'en l'an 2000. La quantité de combustible usagé sorti des réacteurs est proportionnelle aux 2/3 de l'énergie produite l'année précédente et à 1/3 de l'énergie produite deux ans auparavant. La concentration des déchets est réalisée à raison de 100 gallons /10⁴ MW-jour (high-level), 200 gallons /tonne retraitée (intermediate-level), 10'000 gallons /tonne retraitée (low-level) et 2,1, respectivement 8,7 ft³ /tonne retraitée pour les gaines des LWR et LMFBR. L'Uranium et le Plutonium abandonnés dans les déchets représentent chacun 0,5 o/o du poids de ces actinides présents dans le combustible usagé. En ce qui concerne le Monde libre, l'activité accumulée provient du relachement complet du Tritium et de sa dilution isotropique dans l'hydrosphère (océans jusqu'à 40 m de profondeur, rivières, lacs et atmosphère jusqu'à 10 km d'altitude) ainsi que du relachement complet du Krypton et de son mélange selon la densité de l'air jusqu'à 13 km d'altitude dans l'atmosphère.

Réacteurs à fusion: L'étude approfondie des structures et de la technologie d'un réacteur à fusion date d'une période relativement récente. Les problèmes de radioactivité qui leur sont liés n'ont été abordés le plus souvent que pour démontrer le risque réduit que représentent les réacteurs thermonucléaires en comparaison des réacteurs à fission. Il faut toutefois noter qu'il n'existe à l'heure actuelle aucune installation capable de

produire le flux de neutrons qui règnera dans ces futures machines. La radioactivité, la production et la fuite de Tritium et les conséquences d'accidents ne résultent donc que de calculs, d'extrapolations et d'essais en laboratoire. Selon la référence 22, ces problèmes ne dépendent que peu du réacteur de référence choisi. Les réacteurs de la première génération fonctionneront au Deutérium-Tritium (D-T), posséderont probablement une structure intérieure en Nobium et régénéreront le Tritium dans un manteau de Lithium.

Bien que le Tritium puisse être économiquement produit par irradiation du Lithium, cet isotope est pratiquement inexistant à l'état naturel à la surface du globe (1800 gr, dont 99 o/o dans l'hydrosphère) (23). Participant comme catalyseur (brûlé puis régénéré) dans la réaction D-T, il sera donc nécessaire de réduire les fuites hors du réacteur et de ses installations annexes au niveau le plus bas. Cette contrainte sera aisément satisfaite, car, contrairement au cas des réacteurs à fission, le Tritium n'aura vraisemblablement aucune occasion de s'oxyder pour former de l'eau tritiée et sa rétention ne nécessitera par conséquent que des séparateurs simples et peu onéreux. Une fuite correspondant à 10^{-6} /jour de l'inventaire, soit moins de 100 Ci/jour, semble réalisable (19, 22, 66, 72).

La consommation spécifique en Tritium d'un réacteur D-T s'établira d'après les prévisions entre 0,036 et 0,082 gr/kW-an (19, 67, 69), soit environ 0,5 à 1,2 kg/jour pour un réacteur de 5000 MW(th). La production de Tritium (breeding) dépendra toutefois du type de machine et se situera entre 1,02 et 1,6 par an (23, 65, 68). Il semble certain que le réacteur thermonucléaire régénérera plus de Tritium que n'en produit un réacteur à fission de puissance équivalente. Les chiffres cités indiquent 700 Ci/kW-an dans le manteau de Lithium ou un facteur allant de un à plusieurs ordres de grandeur par rapport au Tritium trouvé dans les produits de fission (22, 23).

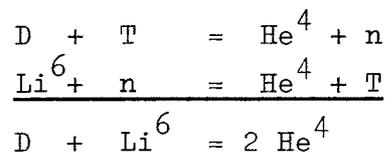
L'inventaire total de Tritium dans un réacteur de 5000 MW(th) variera entre 0,8 et 20 kg au maximum, soit $1,6 \cdot 10^{-4}$ à $40 \cdot 10^{-4}$ gr/kW (19, 69) dont environ $4 \cdot 10^{-7}$ gr/kW dans le plasma et $2,7 \cdot 10^{-5}$ gr/kW dans la structure, le manteau et l'échangeur de chaleur (22, 72). Par opposition au Nobium réfractaire et donc contrôlable, le Tritium est volatile et représente

l'élément demandant la plus grande surveillance en fusion thermonucléaire. Sa radioactivité spécifique étant de 9600 Ci/gr, la radioactivité totale du combustible présent à l'intérieur et en dehors du réacteur ne dépassera pas 40 Ci/kW. En comparaison, l'inventaire d'un réacteur à fission de même puissance en I^{131} se situe entre 20 et 50 Ci/kW (19, 66, 72). A part le Tritium, le seul autre élément prévu dans l'inventaire radioactif d'un réacteur thermonucléaire est le Nobium situé dans la structure du manteau proche du plasma, ou le Vanadium qui pourrait le remplacer s'il s'avère capable de résister aux contraintes mécaniques.

Le risque représenté par un isotope ne dépend pas uniquement de sa radioactivité, mais aussi, et pour une part égale, de la concentration maximum (MPC) dans l'air ou dans l'eau que peut supporter l'individu d'après les règlements actuellement en vigueur. Ce risque biologique (relative biological hazard) peut être exprimé par le quotient de la radioactivité spécifique (Ci/W) de l'isotope considéré par son MPC (Ci/m³). Il correspond en fait au volume d'air ou d'eau par unité de puissance du réacteur (m³/W) nécessaire à la dilution de l'isotope jusqu'à un niveau inoffensif à l'homme. La table 23, tirée des références 21 et 72, compare les radioactivités spécifiques des inventaires, les MPC et les risques biologiques d'un réacteur de référence à fusion (RFR) tel qu'il est présentement conçu à ceux d'un surgénérateur à fission (LMFBR).

Les valeurs mentionnées dans la table 23 correspondent à la radioactivité présente dans l'inventaire de Tritium, dans les structures du manteau entourant le plasma ou dans les isotopes indiqués du combustible usagé et se réfèrent à la concentration maximum du Tritium relâché sous forme de vapeur d'eau ou de l'Iode concentré dans la thyroïde de l'enfant après cheminement à travers le fourrage, la vache et le lait.

Le seul déchet d'un réacteur à fusion sera l'Hélium⁴ non-radioactif provenant des réactions:



et dont la quantité ainsi produite s'élèvera à environ 0,21 gr/kW-an (67, 69).

Les structures du manteau deviendront radioactives par suite de l'intense bombardement neutronique qu'elles subiront. Il est à craindre que ce bombardement n'affaiblisse aussi leurs caractéristiques mécaniques de sorte que leur durée de vie pourrait être limitée à 10 ou 20 ans. Un recyclage est toutefois envisagé étant donné la relative rareté du Nobium (21). Dans une structure en Nobium, les isotopes à considérer sont le $\text{Nb}^{93\text{m}}$ et le Nb^{94} . Leur radioactivité sera produite à raison de 8,8 et $2,9 \cdot 10^{-3}$ Ci/kW-an respectivement, tandis que la radioactivité accumulée sur 1000 ans (équilibre) atteindra 173 et 2,9 Ci/kW. En revanche, dans une structure en Vanadium, élément qui ne présente pas d'isotope à longue durée de vie, la radioactivité ne proviendra que des impuretés, ce qui réduira les risques biologiques d'un facteur 10^3 à 10^4 (21, 24, 72). La table 24 donne les radioactivités accumulées dans les structures, les MPC et les risques biologiques d'un réacteur à fusion (RFR). Les valeurs du MPC sont rapportées à l'eau en vue du stockage en sous-sol. Pour le $\text{Nb}^{93\text{m}}$, le MPC-air serait $4 \cdot 10^{-8}$ Ci/m³. Il est probable que la radioactivité induite dans la structure en Nobium d'un réacteur thermonucléaire sera du même ordre de grandeur que celle d'un réacteur à fission (11, 20, 22, 65).

Remerciements

L'auteur remercie F. Hofmann, A. Colomb (Electricité Ouest Suisse) et M. Lung (St Gobain, France) des renseignements qu'ils lui ont fournis et qui ont été utiles à l'élaboration des chapitres relatifs à l'énergie nucléaire.

Ce travail a été financé par le Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique.

A P P E N D I C E A

=====

PROBLEMES ASSOCIES A L'IRRADIATION

Définitions

Quantité de radiation (rayons X, γ)

$$\begin{aligned} 1 \text{ Roentgen} &= 0,113 \text{ erg/cm}^3 \text{ air} \\ &= 87,6 \text{ erg/gr air} \end{aligned}$$

Dose unité de rayonnement (X, γ) absorbé

$$1 \text{ Rad} = 100 \text{ erg/gr de tissu irradié}$$

Dose unité de rayonnement effectivement absorbé
(Roentgen equivalent man)

$$1 \text{ Rem} = 1 \text{ Rad} \times \text{RBE}$$

Efficacité biologique relative (par rapport au rayonnement X)

Rayonnement X, électrons, positrons	:	RBE	=	1
Particules ionisantes lourdes $\leq 3,5$ keV*	:	RBE	=	1
" " " 3,5 - 7 keV*	:	RBE	=	2
" " " 7 - 23 keV*	:	RBE	=	5
" " " 23 - 53 keV*	:	RBE	=	10
" " " 53 - 175 keV*	:	RBE	=	20

(* énergie transférée à travers une épaisseur d'un micron d'eau)

Unité de radioactivité

$$\begin{aligned} 1 \text{ Curie} &= \text{poids de tout isotope radioactif subissant} \\ &3,7 \cdot 10^{10} \text{ désintégrations par seconde} \\ &(\text{Radium : poids} = 1 \text{ gr}) \end{aligned}$$

Désintégration (22)

Si N_0 représente le nombre initial d'atomes, N le nombre d'atomes désintégrés et λ la constante de désintégration, alors:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad ; \quad dN = - \lambda N dt \quad ; \quad \frac{dN}{dt} = - \lambda N$$

$$\frac{dN}{dt} = 3,7 \cdot 10^{10} \frac{\text{désintégrations}}{\text{sec}} = 1 \text{ Curie (1 gr Radium)}$$

$$\text{vie moyenne (} N = 1/e N_0 \text{) : } t_m = 1/\lambda$$

$$\text{demi-vie (} N = 1/2 N_0 \text{) : } t_{1/2} = 0,693/\lambda$$

La demi-vie, définie par la disparition de la moitié des atomes initiaux d'un isotope, peut provenir de sa désintégration naturelle (demi-vie physique) ou de son élimination d'un lieu déterminé (demi-vie biologique, par mélange, absorption, combustion, etc.). Pour le Tritium, par exemple, les demi-vies sont:

Demi-vie physique	12,2 ans
biologique (remplacement de l'eau dans le corps)	~ 12 jours
combustion (inventaire, réacteur D-T)	~ 3 jours
mélange (isotropique dans le volume d'eau de la biosphère, dont l'océan sur 75 m de profondeur)	~ 3,5 ans
échange (entre l'atmosphère et l'océan sur 75 m de profondeur)	~ 25 ans

Doses moyennes d'irradiation naturelle (5,14,52,54)

Sol + rayonnement cosmique:

Suisse (75 o/o + 25 o/o)	~ 122	mrem/an
USA	100 - 150	mrem/an
Gd. Bretagne (max)	1000	mrem/an
Indes, Brésil (max)	1600	mrem/an
Corps humain (Potassium ⁴⁰)	~ 15	mrem/an
Inhalation + ingestion	~ 20	mrem/an
Habitations (bois < béton < briques)	40 - 130	mrem/an

Doses moyennes d'irradiation additionnelle (5,11,12,14,15,54)

Traitements médicaux (radio, rayons)	15 - 60	mrem/an
Explosions nucléaires (total 10 ¹⁴ Ci)	1,5 - 15	mrem/an
(dose accumulée totale)	100 - 200	mrem)
Centrales nucléaires	0,3 - 1,2	mrem/an

Doses permises maximum, MPD (9,11,14,15,18)

(en plus de la dose d'irradiation naturelle)

Employé dans une installation nucléaire	5 rem/an
dose accumulée (fonction de l'âge)	5 rem x (âge - 18 ans)
Individu dans le voisinage d'une installation nucléaire	} 500 mrem/an
Employé dans un hôpital	
Individu dans la population	170 mrem/an
(5 rem par génération de 30 ans)	

Concentration permise maximum, MPC (11,18,22,66)

Les valeurs diffèrent suivant qu'elles s'appliquent aux employés des centrales nucléaires ou à la population en général, aux concentrations dans l'air ou dans l'eau ou encore qu'elles tiennent compte du cheminement de certains isotopes et de leur concentration accrue sur les cultures et dans les poissons et par suite dans la thyroïde, les os ou tout autre endroit privilégié. Les chiffres indicatifs suivants s'entendent dans l'air pour la population en général (170 mrem/an):

H ³	gaz		2.10 ⁻⁵	Ci/m ³
H ³	vapeur d'eau		2.10 ⁻⁷	Ci/m ³
Kr ⁸⁵ , Xe ¹³³			1.10 ⁻⁷	Ci/m ³
Sr ⁹⁰			~ 10 ⁻¹¹	Ci/m ³
I ¹³¹		1/700 x	1.10 ⁻¹⁰	Ci/m ³
I ¹²⁹		1/7000 x	2.10 ⁻¹¹	Ci/m ³
Pu ²³⁹			6.10 ⁻¹⁴	Ci/m ³

Dans une vigoureuse mise au point, l'auteur de la référence 12 réclame la diminution du MPC de certains isotopes de plusieurs ordres de grandeur par le fait que les animaux puis les hommes, absorbant par leur nourriture jusqu'à 1000 fois leur poids au cours de leur vie, accumulent en eux une radioactivité à chaque fois plus concentrée.

A titre de comparaison, la radioactivité naturelle de boissons courantes s'élève à (54):

eau potable	2 - 7	10 ⁻⁹	Ci/m ³
bière	0,4	10 ⁻⁶	Ci/m ³
lait	1,24	10 ⁻⁶	Ci/m ³

Conversion (18)

Dose en Rem/semaine pour une concentration Xa dans l'air ou Xw dans l'eau exprimée en Curie/m³.

Mode d'exposition	Organe critique	H ³	Kr ⁸⁵
Inhalation et absorption par la peau	corps entier	3,6 10 ⁴ Xa	
	tissus humains	5,8 10 ⁴ Xa	
Ingestion	corps entier	1,9 Xw	
	tissus humains	3,2 Xw	
Submersion dans l'air	corps entier		4 10 ⁴ Xa
	peau	1,7 10 ³ Xa	
Dose externe à 0,75 m au-dessus d'un sol contaminé	corps entier	0	1 10 ² Xa

Ces doses s'entendent par individu dans la population. Pour les employés d'installations nucléaires (semaine de 40 heures), les coefficients sont réduits d'un facteur 3 à 4.

Effets biologiques des radiations (11,12,14,15)

Les organes les plus sensibles aux radiations sont les suivants:

peau
muqueuses du tube digestif
formateurs de globules (moëlle, rate, ganglions)
organes de reproduction (testicules, ovaires).

Il semble admis qu'une irradiation du corps entier est plus dangereuse que son irradiation partielle. De même, une dose appliquée brutalement ou courtement est plus grave que la même dose fractionnée ou lentement accumulée (processus probable de récupération). L'importance des dégats dépend de la quantité de radiation ainsi que de l'âge de l'individu (effets plus graves sur l'embryon ou le nouveau-né).

Il est maintenant admis qu'il n'existe pas de seuil au-dessous duquel une irradiation, même prolongée, resterait sans effet: une irradiation faible mais constante peut provoquer le cancer d'un organe ou des mutations (héréditaires) dans les centres de reproduction. Les auteurs ne sont pas toujours d'accord sur la relation niveau d'irradiation-effets biologiques. Les valeurs rencontrées sont présentées ci-dessous à titre indicatif (corps entier):

1 rad haute dose	: 1 à 3 leucémies supplémentaires/an .10 ⁶ pers.
1 rad faible dose	: 20 " " /an . " "
1 rad concentré	: 20 o/o d'augmentation des leucémies
5 rad concentrés	: malformation dans le développement d'organes
≤ 50 rem	: nombre de cancer doublé
150 rad haute dose	: mortalité probable à 1 o/o
400-600 rad haute dose	: mortalité probable à 99 o/o
500 rem étalés	: pas mortel
(10'000 rad partiels	: sans dommage)

Risques (5,11)

Certains auteurs cherchent à situer les risques dûs aux radiations par rapport à ceux des autres professions ou activités.

Risques professionnels
(probabilité de décès au cours d'une vie)

Aviation (équipage civil)	7	o/o
Mines de charbon	2-5	o/o
Construction	5	o/o
Toutes industries	1	o/o
Usines nucléaires (calculés pour MPD)	2,5	o/o

Risques non-professionnels (sauf usines)
(dommages permanents par an et 10^6 personnes)

Maladies naturelles	10'000
Accidents	500
Accidents de circulation	250
Guerre, suicide (chaque)	200
Emploi d'électricité	20
Usines thermiques	3
Catastrophes naturelles	1
Usines nucléaires	0,1

7 cas mortels dûs à des radiations ont été dénombrés parmi le personnel attaché aux 700 réacteurs expérimentaux ou commercialisés, civils et militaires construits jusqu'à ce jour (54).

Danger

Le fonctionnement de réacteurs nucléaires implique des dangers potentiels. Certains auteurs visiblement exagèrent ou au contraire minimisent ces dangers. La liste comparative ci-dessous énumère les dangers possibles dûs aux conditions de fonctionnement de réacteurs à fission ou à fusion ou dûs à la présence d'isotopes.

Fission (12,13,15,18,26,37,49,53,58,59,60): Pour des raisons d'enrichissement, de géométrie et d'amorçage, un réacteur ne peut exploser à la manière d'une bombe. En revanche, dans la centrale ou à l'usine de retraitement, la quantité totale d'Uranium enrichi ou de Plutonium peut dépasser la masse critique.

Une perte de contrôle partielle ou grave peut conduire à des points chauds ou provoquer des fissures dans les gaines ou le coeur du réacteur. Au pire, elle peut conduire à une explosion mécanique de la première enceinte. Le périmètre de la centrale et, dans les régions à plus forte densité de population, des barrières supplémentaires de confinement gardent la population voisine hors de danger.

Les méthodes les plus efficaces de stocker temporairement le vaste volume de déchets radioactifs liquides et de contrôler dans les nombreuses formations géologiques possibles le fort dégagement de chaleur des déchets concentrés n'ont pas encore été définitivement choisies.

Les dangers résultant de guerres conventionnelles, de sabotages, de détournements ou de transports ne doivent pas être sous-estimés.

Bien que récupéré pour les usages militaires ou comme combustible des surgénérateurs futurs, le Plutonium est extrêmement dangereux chimiquement (poison) et radioactivement (émetteur α). Sa rétention devra être étroitement et continuellement surveillée. Moins d'un μg peut provoquer un cancer local (souris, chien) ou même être mortel (homme).

Fusion (6,20,21,22,58,72,74): En équilibre thermodynamique avec les forces magnétiques de confinement, un plasma thermonucléaire ne peut au plus que se refroidir au contact des parois: il est sûr contre tout danger d'explosion. L'énergie emmagasinée dans le plasma sera si faible, que même en l'absence de contrôle ou de refroidissement, aucun point chaud ne sera à craindre.

Le réacteur thermonucléaire ne produira pas de déchets radioactifs. Le problème de stockage, mis à part les éléments de structure, ne se posera pas.

L'inventaire très réduit en Tritium et son utilisation rapide dans le réacteur rendent pratiquement inexistantes les risques de détournement, de transport ou d'actes de violence. Même son relachement total dans l'atmosphère ne mettra pas en danger la population voisine.

Le Tritium peut fuir à travers la structure en Niobium. L'étanchéité des enceintes, basée sur la technologie des surgénérateurs, et la récupération de cet isotope gazeux par des séparateurs simples et peu onéreux (le Tritium ne se mélangera vraisemblablement jamais à l'eau) pourront être réalisées d'une façon efficace pour limiter les fuites à un niveau acceptable à la population voisine.

Le réacteur thermonucléaire n'existe actuellement pas. Les éventuelles maladies d'enfance ne sont par conséquent pas connues.

Si le prix du combustible ne représentera qu'une très faible fraction des frais d'exploitation, en revanche le coût de construction d'un réacteur à fusion sera plus élevé que celui d'un surgénérateur. Pour des raisons économiques, sa commercialisation pourra en être retardée.

Dans le cas de la fission comme dans celui de la fusion, l'environnement n'est pas mis en danger, sinon par l'évacuation de la chaleur résiduelle due au refroidissement des réacteurs. L'approvisionnement en combustible représente une charge beaucoup moins lourde que pour les centrales à combustible fossile (12, 26, 56, 74). En revanche, les risques et dangers mentionnés plus haut augmenteront statistiquement avec le nombre croissant de réacteurs (construction de plusieurs réacteurs de 1000 MW(e) ou plus par semaine dans les régions industrialisées du globe en l'an 2000 !) (30, 42, 51, 53).

PROBLEMES ASSOCIES AUX COMPOSES CHIMIQUES

CO₂ (3,5,31)

Au cours du XIXe siècle et jusqu'en 1970, la concentration du CO₂ dans l'atmosphère a passé de 290 à 320 ppm en volume. En 1970, sa production à l'échelle mondiale a atteint 1,8 10¹⁰ t/an, dont la moitié au moins s'est probablement dissoute dans les océans. En l'an 2000, sa concentration passera à 380 - 400 ppm. Le risque d'un effet de serre est traité dans le texte au chapitre "Déchets non-nucléaires", p. 18.

SO₂ (5,39)

La production de composés du soufre provient pour 75 o/o de la combustion de combustibles fossiles. Les effets de sa concentration dans l'air sont présentés ci-dessous:

0,3	ppm	: décelable à l'odeur
0,01 - 0,05	ppm	: maladies prouvées après inhalation pendant 1 an
0,2 - 0,7	ppm	: maladies prouvées après inhalation pendant 1 jour
0,5 - 2	ppm	: maladies prouvées après inhalation pendant 1 heure
2 - 30	ppm	: maladies prouvées après inhalation pendant 1 minute
au-delà en temps et ppm		: mortalité accrue

A P P E N D I C E B

=====

Chaleurs de combustion

Sauf mention explicite de la part des auteurs, les valeurs moyennes suivantes, exprimées en kW-an (thermiques), ont été utilisées pour les diverses sources d'énergie:

Charbon	8,1 kWh/kg	$9,3 \cdot 10^{-4}$	kW-an/kg
Huiles	11,6 kWh/kg	$12,1 \cdot 10^{-4}$	kW-an/kg
Gaz naturel	10,5 kWh/m ³	$11,7 \cdot 10^{-4}$	kW-an/m ³
Bois	4 kWh/kg	$4,6 \cdot 10^{-4}$	kW-an/kg
U ²³⁵		~ 3	kW-an/gr
U ²³⁸		~ 2,2	kW-an/gr
Deutérium (D-D, théorique, 7 MeV/atome)		10,7	kW-an/gr
Lithium ⁶ (D-T, théorique, 22,4 MeV/atome)		11,4	kW-an/gr

La chaleur de combustion des combustibles fossiles de qualité inférieure ou des produits raffinés est donnée plus en détail dans la référence 7.

Abondance (2,5,75)

Uranium (U ²³⁵)	U ²³⁵ /U ²³⁸	= 0,7 o/o
(U ²³⁸)		~ 60 gr/tonne roches
Oxyde de Thorium (ThO ₂)		~ 40 gr/tonne roches
Deutérium (océans)	10^{25} atomes/m ³ (eau) = 33,4 gr/m ³ (eau)	
	1 atome/6500 atomes H	
Tritium (océans)	~ 1 atome/10 ¹⁸ atomes H	
Lithium	Li ⁶ / Li ₂ O	= 3,42 o/o
	Li ⁶ / Li métal	= 7,42 o/o
(océans)		~ 1,8 gr/m ³ (eau)

Grandeurs fréquemment rencontrées

Energie:

1 BTU (British Thermal Unit)	=	$2,93 \cdot 10^{-4}$	kWh =	$3,34 \cdot 10^{-8}$	kW-an
1 Q = 10^{18} BTU	=	$2,93 \cdot 10^{14}$	kWh =	$3,34 \cdot 10^{10}$	kW-an
1 Tcal (Téracalorie) = 10^{12} cal	=	$1,163 \cdot 10^6$	kWh =	132,8	kW-an
1 tonne TNT	=	$1,18 \cdot 10^6$	kWh =	135	kW-an

Capacité:

1 barrel (pétrole)	=	159	litres =	1680 kWh =	0,192 kW-an
1 gallon (US)	=	3,79	litres		
1 gallon (impérial)	=	4,546	litres		
1 cft (cubic feet)	=	28	litres		

Système terrestre:

Distance moyenne Terre-Soleil		149,5	10^6	km
Surface du disque terrestre		128	10^6	km ²
Surface totale des continents (29,18 o/o)		148,85	10^6	km ²
Volume des océans		1,5	10^{18}	m ³
Volume d'eau circulant dans la biosphère		27	10^{15}	m ³
Réfectivité de la Terre		~	0,34	

Croissance:

Le taux annuel de croissance (o/o) et le temps (années) nécessaires au doublement d'une grandeur sont reliés par la relation approximative suivante:

$$\text{taux annuel (o/o)} \times \text{temps (ans)} = 70$$

B I B L I O G R A P H I E

=====

REFERENCES GENERALES

- 1) Energy Resources for Power Production
M.K. Hubbert
IEEE T NS, 18, 18 (1971)
- 2) The Energy Resources of the Earth
M.K. Hubbert
Scientific American, 225/3, 61 (1971)
- 3) Energy and Power
C. Starr
Scientific American, 225/3, 37 (1971)
- 4) The Flow of Energy in an Industrial Society
E. Cook
Scientific American, 225/3, 135 (1971)
- 5) Energieerzeugung und Umwelt
H. Grümmer
Atomwirtschaft, 16, 278 (1971)
- 6) Why Fusion in the European Community
D. Palumbo
VII Symposium on Fusion Technology
Grenoble, 24-27 Oct. 1972 - Association Euratom-CEA

REFERENCES SPECIALISEES

Statistiques

- 7) World Energy Supplies 1966-1969
Dept. of Economics and Social Affairs, United Nations
Statistical Papers, Series J, No 14 (1971)

- 8) The World Population Situation in 1970
Dept. of Economics and Social Affairs, United Nations
Population Studies, No 49 (1971)

Fission

- 9) The New Emission Guidelines
B.I. Spinrad
Bull.Atom.Scient. 27/7, 7 (1971)
- 10) Radiation Safety Standards (NRB-69)
I.K. Dibobes et al.
Soviet Atom.Energy, 28, 593 (1970)
- 11) Radiation Pollution of the Environment
P.J. Lindop, J. Rotblat
Bull.Atom.Scient. 27/7, 17 (1971)
- 12) Centrales nucléaires et environnement
Mise au point
Ph. Lebreton
Extrait du Bulletin Mensuel de la Société Linnéenne de Lyon
1972-1973
- 13) Plutonium and the Energy Decision
D.P. Geesaman
Bull.Atom.Scient. 27/7, 33 (1971)
- 14) L'effet des radiations sur des objets biologiques et sur les êtres
humains, ainsi que les buts de la radioprotection
H. Fritz-Niggli
publié par l'Ass.Suisse pour l'Energie Atomique (ASPEA), Berne
- 15) Centrales nucléaires, source d'énergie propre
Association Suisse pour l'Energie Atomique (ASPEA), Berne
Nov. 1972

- 16) Energy from Breeder Reactors
F.L. Culler, W.O. Harms
Physics Today, 25/5, 28 (1972)
- 17) Aperçu sur le refroidissement des centrales nucléaires
B. Pellaud
Document de travail
Office Fédéral de l'Economie Energétique (juin 1971)
- 18) Siting of Fuel Reprocessing Plants and Waste Management Facilities
ORNL 4451
UC-70 Waste Disposal and Processing, July 1971

Fusion

- 19) Controlled Nuclear Fusion: Status and Outlook
D.J. Rose
Science 172, 797 (1971)
- 20) Why Fusion ?
W.G. Gough
Proc.Symp. on Thermonuclear Fusion Reactor Design
Texas Tech. University, 256-331, June 2-5, 1970
- 21) Fusion Power, an Assessment of ultimate Potential
Div. of Controlled Thermonuclear Research
USAEC, Wash-1239, Feb. 1973
- 22) Preliminary Appraisal of the Hazards
Problems of a D-T Reactor Power Plant
A.P. Fraas, H. Postma
ORNL-TM 2822, Dec. 1970
- 23) Sources of Tritium and its Behaviour upon Release to the Environment
D.G. Jacobs
Health Physics Div; Nuclear Safety Information Center
ORNL, TID-24635 (1968)

- 24) Long Lived Activities and Radioactive Waste Managements with
D-T Fusion Reactors
D. Steiner
Nuclear Fusion, 11, 307 (1971)
- et) Emergency Cooling and radioactive Waste-Disposal Requirements for
Fusion Reactors
D. Steiner
IV Conference Proceeding, Vol. III, Paper K-11
Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research
Madison, 17-23 June 1971

Autres

- 25) The Flow of Energy in the Biosphere
D.M. Gates
Scientific American, 225/3, 89 (1971)
- 26) Solar Power
N.C. Ford, J.W. Kane
Bull.Atom.Scient. 27/8, 27 (1971)
- 27) Geothermal Energy, the neglected Energy Option
R.W. Rex
Bull.Atom.Scient. 27/8, 52 (1971)
- 28) Turning up the Gas
S. Jacobsen
Bull.Atom.Scient. 28/5, 35 (1972)
- 29) Extraterrestrial Imperative
K.A. Ehricke
Bull.Atom.Scient. 27/9, 18 (1971)

REFERENCES COMPLEMENTAIRES

Monde

- 30) Global Effects of Increased Use of Energy
A.M. Weinberg, R.P. Hammond
Bull.Atom.Scient. 28/3, 5 (1972)
- 31) I Limiti dello Sviluppo
Estratto da S e T 72/annuario della EST
(Enciclopedia della Scienza e della Tecnica, Edizioni
Scientifiche e Tecniche Mondadori)
- 32) Four Lectures on Fusion Power
R.G. Mills
Matt. 145, Princeton (1962)
- 33) Plan or Panic ?
R. Wilson
Bull.Atom.Scient. 28/5, 29 (1972)
- 34) Oeldorado 71
Publication Esso Standard, Switzerland
- 35) La consommation mondiale de pétrole jusqu'en l'an 2000
E. Trümpy
L'Ordre Professionnel, 4 nov. 1971, p. 9
- 36) De l'or noir en Suisse ?
Journal du Touring Club Suisse
No 32, 10 août 1972

USA

- 37) An Agenda for Energy
H.C. Hottel, J.B. Howard
Technology Review, 74/3, 38 (1972)
- 38) Menace de crise de l'énergie aux Etats-Unis
a) de la surabondance à la pénurie
b) la domestication des énergies solaire et géothermique
R.F.L.
Gazette de Lausanne, 16 et 23 février 1973
- 39) Must Fossil Fuels Pollute ?
H. Perry, H. Berkson
Technology Review, 74/2, 34 (1971)
- 40) Power Generation and the Environment
R. Eliassen
Bull.Atom.Scient. 27/7, 37 (1971)
- 41) Toward a Policy of Energy Conservation
S.D. Freeman
Bull.Atom.Scient. 27/8, 8 (1971)
- 42) Outlook for Energy in the United States
J.D. Emerson
Bull.Atom.Scient. 27/8, 18 (1971)
- 43) Energy Policy-Making
I.L. White
Bull.Atom.Scient. 27/8, 20 (1971)
- 44) The Conversion of Energy
C.M. Summers
Scientific American, 225/3, 149 (1971)

CEE

- 45) 1985: Une lourde et délicate échéance pour la politique énergétique de la CEE
Pierre Collet
Gazette de Lausanne, 20-21 janvier 1973

Suisse

- 46) Entwicklungsperspektiven der schweizerischen Energiewirtschaft
Entwicklungsperspektiven der schweizerischen Volkswirtschaft bis zum Jahre 2000 - Teil VI
Arbeitsgruppe Perspektivstudien, St.-Gallen, April 1972
- 47) Der Energiebedarf der Schweiz, seine Anwachsen und seine Deckung
Mitgeteilt vom Eidgenössischen Amt für Energiewirtschaft, Bern
Sonderdruck aus dem Bulletin des SEV, "Seite des VSE", 63,
s. 357-368, (1972)
- 48) Überblick über den Energieverbrauch der Schweiz in Jahre 1971
Mitgeteilt vom Eidg. Amt für Energiewirtschaft, Bern
- 49)a)Un important déficit énergétique menace la Suisse
b)La Suisse se dégage peu à peu de la dépendance du pétrole
c)Une pénurie d'énergie menace les Etats-Unis
FAL-24 Heures, 28-29 août, 5 sept. 1972
- 50) Problèmes d'avenir du secteur de l'électricité en Suisse
H. Bergmaier
Bull. Crédit Suisse, oct. 1972, p. 13
- 51)a)L'électricité atomique: de Beznau à votre gramophone
b)Face au risque de pénurie: la course contre la montre est engagée
c)De la santé à la croissance: opposition tous azimuts
Jean-Pierre Bommer
FAL-24 Heures, 23,23,29 janv. 1973

Fission

- 52) On Misunderstanding the Atom
G.T. Seaborg
Bull.Atom.Scient. 27/7, 46 (1971)
- 53) Problèmes énergétiques mondiaux-solutions nucléaires
G.A. Grin
Conférence intern. "Forum Industriel Atomique" et "Société Nucléaire Américaine", Washington, 12-16 nov. 1972
Ambassade de Suisse, Washington, DC
- 54) L'énergie nucléaire, sûre, propre, indispensable, inépuisable
Publié par l'Ass. Suisse pour l'Energie Atomique (ASPEA)
juin 1972, Berne
- 55) Electric Power from Nuclear Fission
M. Benedict
Bull.Atom.Scient. 27/7, 8 (1971)
- 56) New Goals for Atomic Energy
V.L. Parsegian
Bull.Atom.Scient. 27/8, 2 (1971)
- 57) Atomenergie - Atomkraftwerk
A. Meichle
Herausgegeben von der Elektrowirtschaft, Zürich (1971)
- 58) Energy and Environment
H. Alfvén
Bull.Atom.Scient, 28/5, 5 (1972)
- 59) The Unsolved Problem of Nuclear Wastes
W.W. Hambleton
Technology Review, 74/5, 15 (1972)
- 60) Development of the Commercial Breeders
J. Barnard et al.
Nuclear News, 15/12, 30 (1972)

- 61) Creating Power Plants: the Costs of Controlling Technology
W.W. Lowe
Technology Review, 74/3, 22 (1972)
- 62) Le ravitaillement de la Suisse en combustible nucléaire
B. Pellaud
L'Ordre Professionnel, 4 nov. 1971, p. 8
- 63) Table ouverte: centrale nucléaire
Claude Zangger, Alain Colomb
Emission TV romande, 21 janv. 1973
- 64) Uranium 235 Fission-Production as a Function of Thermal Neutron
Flux, Irradiation Time and Decay Time
Atomic Concentrations and Gross Totals
ORNL-2127, Part 1, Vol. 1 and 2
Physics and Mathematics, TID 4500 (1958)

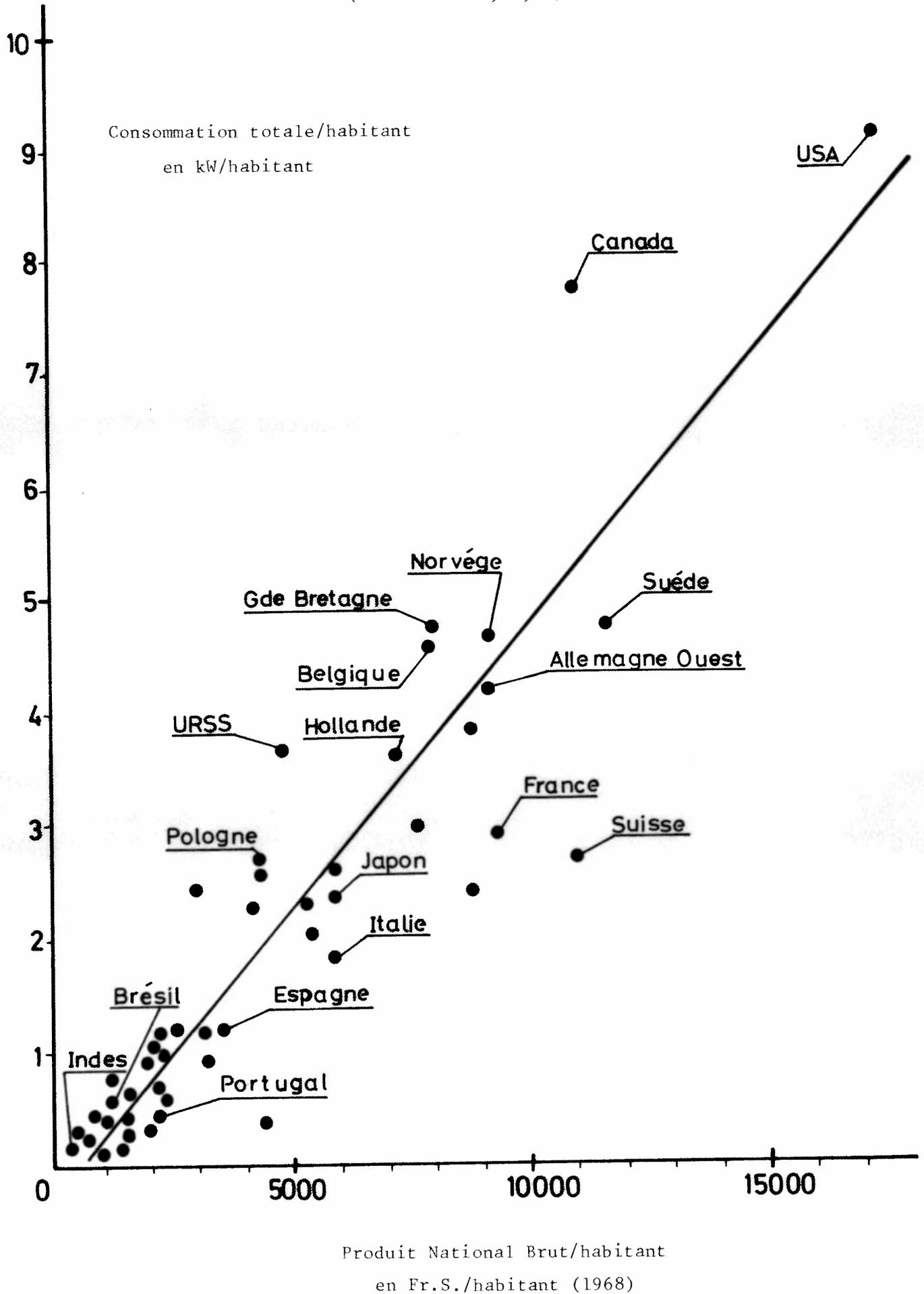
Fusion

- 65) Final Report on the IAEA Panel on International Cooperation in
Controlled Fusion Researches and its Application
Nuclear Fusion, 10, 413 (1970)
- 66) The Quest for Fusion Power
L.M. Lidsky
Technology Review, 74/3, 10 (1972)
- 67) Some Engineering Problems of Thermonuclear Reactors
R.G. Mills
Matt 548, Princeton, June 1967
- 68) Texas Symposium on the Technology of Controlled Thermonuclear
Fusion Experiments and the Engineering Aspects of Fusion Reactors
20-22 Nov. 1972
Nuclear Fusion, 13, page 281 (1973)

- 69) Tritium Recovery in Fusion Power Reactor
E.F. Johnson
Matt 801, Princeton, Nov. 1970
- 70) Getting specific on Fusion
R. Hirsch, R. Hancox
Atomic Nuclear Society, Winter Meeting
Nuclear News, 15/12, 40 (1973)
- 71) Statement of Record
R.W. Gould
Hearings on CTR before the JCAE
Washington DC., 10-11 Nov. 1971
- 72) Status of full-scale Fusion Reactor Power Plant Studies
A.P. Fraas
Special JCAE Hearings on CTR, 10-11 Nov. 1971
- 73) Environmental Aspects of Fusion Power Plants
A.P. Fraas
Transactions Atomic Nuclear Society
Winter Meeting, Wash.DC. Nov. 1972
- 74) Notes on the 4th Conf. on Plasma Physics and Nuclear Fusion Research
at Madison, Wisc. 17-23 June, 1971
Comments of L. Artsimovich
Bull.Atom.Scient. 27/8, 50 (1971)
- 75) The promised Land of Fusion
R.C. Cowen
Technology Review, 74/3, 5 (1972)

Figure 1

(Références 4,31,46)



T a b l e I

Population, en millions d'habitants

(Références 4,8,47)

	1970	2000
Monde	3.635	6.514
Amérique du Nord	228	333
Amérique latine	283	652
Asie	2.056	3.778
Afrique	344	818
Océanie	19	35
Europe	705	898
USA	205	315
CEE	188	} ~ 350
AELE	96	
Suisse	6,144	7,544

T a b l e II

Consommation par habitant, en kW

(Références 3,6,7,16,22,29,32,34,36,39,44,45,46,47,50,56,65)

	1 9 7 0		2 0 0 0	
	totale	électrique	totale	électrique
Monde	1,42 - 1,87	0,325 - 0,49	2,79-3,7	1,32 - 2,5
USA	9,1 - 13,9	1,81 - 3,06	13,5 - 28	5,1 - 9,5
CEE	3,5 - 4,75	~ 0,332	} ~ 11,1	~ 1,95
AELE	~ 4,03	~ 0,51		
Suisse	2,92 - 3,54	0,48 - 0,53	7 - 8,62	1,36 - 1,51

T a b l e III

Répartition de la consommation par habitant, en %

USA 1970

(Référence 30)

	Résidence	Commerce	Transport	Industrie	Autre	Total
Chauffage	11,3	1,2	0,3	1,3	0,7	14,8
Autre chaleur	3,2	4	-	20	6	33,2
Transport	-	-	20	-	-	20
Usage non-énergétique	-	-	-	4	7	11
Electricité	5	3	-	10	3	21
T o t a l	19,5	8,2	20,3	35,3	16,7	100

T a b l e IV

Consommation globale, en 10⁶ kW

(Références 3,6,7,16,20,22,29,32,34,39,43,44,45,46,47,50,56,65)

	1970		2000	
	totale	électrique	totale	électrique
Monde	5030 - 6800	1140 - 1710	19.600 - 25.600	8560 - 15.000
USA	1870 - 2780	364 - 612	4.540 - 8.400	1670 - 2.850
CEE	654 - 890	~ 61	} 3.880	~ 685
AELE	~ 386	~ 50		
Suisse	17,8 - 21,7	3,04 - 3,26	53 - 64,3	10,3 - 11,4

T a b l e V

Répartition de la consommation par sources, en %
 (Références table IV, 3,4,6,7,11,18,37,38,46,47,49,52,53)

1970	Charbon	Huiles	Gaz	Hydraulique	Nucléaire	Nucléaire/Electricité	Production Electricité
Monde	~ 36	~ 41	~ 20,5	~ 2,3	~ 0,2	~ 0,8	~ 24
USA	20	43	32,8	3,9	0,3	1,23	24,4
CEE } AELE }	31	56	7,6	5	~ 0,4	~ 3,9	~ 9,5
Suisse	4,4	78,4	0,1	15,1	~ 0,4	~ 2,5	15,9
2000							
Monde	-	-	-	-	16 - 23	28 - 50	37,5 - 60
USA	~ 15	~ 34	~ 27,5	~ 2,5	17 - 26	45 - 62,5	38 - 50
CEE } AELE }	-	-	-	-	-	75	17,7 - 50
Suisse	0,1	70,1	9,8	7,4	12,6	63	15,9 - 20

T a b l e VI

Répartition de la consommation par sources et par secteurs, en %USA 1970

(Référence 37)

	Industrie	Commerce + Résidence	Transport	Autre	Production Electricité	Total
Charbon	8,1	0,6	0		11,3	20
Huiles	7,45	9,25	22,9		3,4	43
Gaz	15,3	10,7	1		5,8	32,8
Hydraulique	0	0	0		3,9	3,9
Nucléaire	0	0	0		0,3	0,3
Total	30,85	20,55	23,9		24,7	100

T a b l e VII

Répartition de la consommation par sources et par secteurs, en %USA 2000

(Référence 3)

	Industrie	Commerce	Résidence	Transport	Autre	Electricité	Total
Charbon	11,1	1,95	3,9	0	1,25		18,2
Huiles	7,8	1,85	1,65	22,4	5,4		39,1
Gaz	13,6	1,7	5,05	0,6	2,55		23,5
Hydraulique	1,05	0,25	0,55	0	0,05		1,9
Nucléaire	9,45	2,25	4,85	0	0,75		17,3
Total	43	8	16	23	10		100
Consommation Electricité	21	5	10,3	0	1,7		38

T a b l e VIII

Répartition de la consommation par sources et par secteurs, en %

Suisse 1970

(Référence 46)

	Industrie	Commerce + Résidence	Transport	Total
Charbon	1,35	2,75	0	4,1
Huiles	19,8	35,5	22,4	77,7
Gaz	0	1,2	0	1,2
Hydraulique } Nucléaire }	7,35	8,35	1,3	17
Total	28,5	47,8	23,7	100
Consommation Electricité	7,77	8,77	1,36	17,9

T a b l e IX

Répartition de la consommation par sources et par secteurs, en %

Suisse 2000

(Référence 46)

	Industrie	Commerce + Résidence	Transport	Total
Charbon	0,15	0	0	0,15
Huiles	15,15	34,55	21	70,7
Gaz	3,75	6	0	9,75
Hydraulique } Nucléaire }	7,65	10,55	1,2	19,4
Total	26,7	51,1	22,2	100
Consommation Electricité	7,9	10,85	1,25	20

T a b l e X

Taux annuel de croissance de la consommation, en %

(Références 3,6,7,8,20,29,34,36,37,39,40,43,45,46,47,51,53,54,65)

	1960 - 1970		1970 - 2000		1960-1970	1970-2000
	totale	électrique	totale	électrique	p o p u l a t i o n	
Monde	3,5 - 4,9 ^x	5,8 - 7	3,6 - 5,4	6,7 - 7	2 - 2,2 ^x	2 - 2,3
USA	3,2 - 4,5	5,5 - 9,25 ^x	2,5 - 5,1	5 - 7,1	0,75 - 0,9	1,3 - 1,5
CEE	4 - 6,2 ^x	5,6 - 7 ^x	3,5 - 5,2	6,15	0,6 - 0,8	0,7
Suisse	7 - 7,6	4,2 - 7,2 ^x	3,6 - 4	4 - 7,2	1,4	0,7

Le taux de croissance durant l'année 1970 est marqué par un x ; à défaut, il se situe entre les valeurs indiquées dans les colonnes 1960-1970

T a b l e XI

Taux annuel de croissance de la consommation par sources, en %

1960 - 1970

(Références 3,7,34,36,46,47)

	1 9 6 0 - 1 9 7 0				
	Charbon	Huiles	Gaz	Hydraulique	Nucléaire
Monde	0,6 - 3,5 ^x	5,9 - 9 ^x	6,3 - 9	3,8 - 8,1	
USA	1 - 2	4 - 4,7 ^x	4,6 - 5	2,9 - 7,1	
CEE	- (0,8)	2,6 ^x - 13,4	18,3	-	
Suisse	-(10,4-14)	6 ^x - 12,6	1	2,6	

Le taux de croissance durant l'année 1970 est marqué par un x ; à défaut, il se situe entre les valeurs indiquées

T a b l e XII

Taux annuel de croissance de la consommation par sources, en %

1970 - 2000

(Références 3,16,18,34,35,45,46,47,55)

	1 9 7 0 - 2 0 0 0				
	Charbon	Huiles	Gaz	Hydraulique	Nucléaire
Monde	-	4,2 - 5,4	-	-	16,6 - 19
USA	2,6	2	2,3	~0	5,3 - 17,4
CEE	- (2)	5,1	9,7	~0	28,5
Suisse	-(6,3-8)	3,3 - 3,6	10,8 - 20,4	-	7

T a b l e XIII

Durée des réserves mondiales, en années

(Références 1,6,22,30,33,46,54,66,73)

Charbon	50 - 400
Huiles	20 - 60
Gaz	40 - 50
Uranium (sans surgénérateur)	15 - < 100
Uranium (avec surgénérateur)	1000 - ∞
Thorium	
Lithium (réacteur D - T)	150 - > 1000
Déutérium (réacteur D-D)	10 ⁶ - ∞

T a b l e XIV

Réserves mondiales en combustibles fossiles, en kW-an

(Références 1,2,3,6,30,31,32,40,46,65)

	prouvées	futures
Charbon	0,67 - 1,07 10 ¹²	3,6 - 7,0 10 ¹²
Huiles	0,87 - 2 10 ¹¹	3,14 - 5,7 10 ¹¹
Gaz	0,26 - 1,7 10 ¹¹	3,35 - 4,06 10 ¹¹
Fossile total	0,88 - 3,4 10 ¹²	0,76 - 1,37 10 ¹³

T a b l e XV

Réserves mondiales en Uranium et Thorium, en kW-an et tonnes

(Références 1,2,3,5,6,32,56,62,65)

			L W R	Surgénérateurs
Uranium + Thorium (kW-an)	prouvées	prix actuel (8\$/lb)	1,14-3 10 ¹²	3,4 10 ¹²
		2x prix actuel		2-30 10 ¹³
	futures	qualité médiocre		5,4-7 10 ¹⁴
U ₃₈ (tonnes)	prouvées	5 - 10 \$/lb	890 - 1000	10 ³
		10 - 15	800 - 1600	10 ³
		15 - 30	540	10 ³
	probables	≤ 30	4100 - 5800	10 ³
	futures	océans	4	10 ⁹

T a b l e XVI

Réserves mondiales en Lithium et Deutérium, en kW-an et tonnes

(Références 1,2,6,21,32,56,65,66)

			tonnes	kW - an
Lithium ⁶	prouvées	économiques	2 - 6,75 10 ⁵	2,4 - 7,6 10 ¹²
	futures		quelques 10 ⁶	0,16- 2,3 10 ¹⁴
Deutérium	théoriques	océans	5 10 ¹³	3,3 - 5,7 10 ²⁰

T a b l e XIX

Déchets industriels, ménagers et municipaux répartis par secteurs, en 10⁶ t/an et kg/kW-an

USA 1970

(Références 20,29,40,43)

	Répartition moyenne		Déchets	
	%	10 ⁶ kW	10 ⁶ t / an	kg / kW - an
Industrie	39,8	915	~ 100	109
Commerce	9	207	~ 10	48
Résidence	20,4	470	~ 90	192
Municipalité	?	?	~ 160	?

T a b l e XX

Caractéristiques de réacteurs LWR et LMFBR de référence

(Référence 18)

			L W R	L M F B R		
			coeur	m a n t e a u		
				axial	radial	
Puissance (1000 MW(e))	MW(th)	3083				
Rendement	%	32,4				
Puissance spécifique (facteur charge 0,85)	MW/t	34,8 (30)	175 (148)	5,5 (4,6)	10 (8,4)	
Energie spécifique (moyenne équivalente)	MW-j/t	33000	80000	2500	8100	
Charge	t	88,6 (U)	12,6 (U+Pu)	7,32 (U)	26,7 (U)	
Enrichissement	%	3,3 (U ²³⁵)	15,6 (Pu ²³⁹)	0,3 (U ²³⁵)	1,96 (U ²³⁵)	
Recharge	intervalle	jour	365	153	153	
	fraction		1/3	1/3	3/16	

Radioactivité et poids spécifiques des principaux déchets de fission

(Référence 18)

(LWR retraitement après 150 jours)
 (LMFBR retraitement après 30 jours)

Isotope	½ vie	Danger	Cheminement	L W R		L M F B R		Ci / gr
				Ci/kW-an	gr/kW-an	Ci/kW-an	gr/kW-an	
Pu 239	24.000 ans	α, poison	fixation chimique	1,82 10 ⁻⁵	2,96 10 ⁻⁴	1,95 10 ⁻⁴	3,18 10 ⁻³	6,15 10 ⁻²
Pu total				6,8 10 ⁻³	5,2 10 ⁻⁴	3,4 10 ⁻²	4,76 10 ⁻³	
Sr 90	28 ans	poison	cultures, poissons; remplace calcium	0,85	6 10 ⁻³	0,47	3,4 10 ⁻³	142
Cs 137	26,6 ans			1,17	12,2 10 ⁻³	1,21	13,8 10 ⁻³	
I 131	8,05 jours	atteinte croissance enfant	fourrage - lait - thyroïde enfant	2,4 10 ⁻⁵		1,53		
I 129	stable			4,2 10 ⁻⁷	2,58 10 ⁻³	5,85 10 ⁻⁷	3,62 10 ⁻³	1,63 10 ⁻⁴
Kr 85	10,27 ans	augment. générale dose irradiation	corps entier	0,124	3,18 10 ⁻⁴	0,113	2,88 10 ⁻⁴	391
H 3	12,2 ans			7,7 10 ⁻³	7,9 10 ⁻⁷	1,03 10 ⁻²	1,07 10 ⁻⁶	
Produits Fission				48,5	0,388	222	0,386	
Actinides				0,2	6,4 10 ⁻²	8,7 10 ⁻¹	6,35 10 ⁻²	
Gaines				0,31	3	2,76	3,9	
high-level				~ 3,6				
intermediate-level				2,2-5,6 10 ⁻⁴				
low - level				3,9-46 10 ⁻⁶				

T a b l e XXII a)

Puissance nucléaire, poids de combustible retraité, volume et radioactivité des principaux déchets de fission

USA 1970 - 2000

(Références 18,53)

U S A				1970	1980	1990	2000
Puissance installée	LWR		GW(e)	14	149	223	209
	LMFBR		GW(e)	0	4	145	526
Puissance produite	total		GW(e)	8,1	114	274	505
Combustible usagé retraité			t/an	94	3534	13.530	15.000
Déchets (liquides) high-level,	prod.	acc.	m ³ /an	77	4400	12.200	21.000
			m ³	77	20000	108.000	272.000
intermediate -level	prod.	acc.	m ³ /an	140	3540	11.800	14.500
			m ³	140	15900	91.000	223.000
low-level	prod.	acc.	m ³ /an	7250	177000	680.000	635.000
			-	déchargé dans l'environnement			
(solides) gaines	prod.	acc.	m ³ /an	8,4	232	1.150	2.440
			m ³	8,4	1035	8.900	28.800
Déchets, prod.fission H ³	prod.	acc.	MCi/an	0,036	2,1	6,2	11,9
			MCi	0,033	7,29	36,2	89,5
Kr ⁸⁵	prod.	acc.	MCi/an	0,59	33	90	148
			MCi	0,56	124	567	1190
Sr ⁹⁰	prod.	acc.	MCi/an	3,99	227	556	765
			MCi	3,98	962	4640	9550
I ¹²⁹	prod.	acc.	MCi/an	1,96	112	435	670
			MCi	1,85	476	2700	7550
Cs ¹³⁷	prod.	acc.	MCi/an	5,55	316	878	1510
			MCi	5,27	1280	6540	15600
actinide Pu ²³⁸⁻²⁴²	prod.	acc.	MCi/an	0,03	1,72	10,25	31,2
			MCi	0,03	6,7	56,1	224,9
Am ^{241,243}	prod.	acc.	MCi/an	0,009	0,52	4,54	15,7
			MCi	0,009	2,54	24,2	126,2
Cm ^{242,244}	prod.	acc.	MCi/an	1,012	64,3	274,7	716,3
			MCi	0,853	73,1	322	742
total	β	acc.	MCi	210	18900	84500	209000
Réacteurs*, isotopes	Pu	prod.	t/an	0,9	26	220	510
Déchets, isotopes	total	acc.	t	1,75	451	2440	6200

* 0,5 % du Plutonium produit dans les réacteurs est perdu dans les déchets

T a b l e XXII b)

Monde libre 1970 - 2000

Monde libre				1970	1980	1990	2000
Puissance produite	total		GW(e)	10	120	420	1000
Déchets, prod. fission	H ³	prod.	MCi/an	0,15	1,8	6	15
		acc.	MCi	0,3	6,5	30	96
	Kr ⁸⁵	prod.	MCi/an	5	60	200	520
		acc.	MCi	14	220	1100	3000
	Sr ⁹⁰	prod.	MCi/an		380		1600-2100
total		acc.	MCi		31000		4-5,5 10 ⁵

Risques biologiques relatifs résultant de l'inventaire d'un réacteur à fusion (RFR) et d'un surgénérateur (LMFBR)

(Références 21,72)

	Inventaire	Radioactivité (Ci / W(th))	MPC air (Ci / m ³)	Risque biologique a) (m ³ / W (th))
RFR	H ³ (vapeur d'eau)	1,2 10 ⁻²	2 . 10 ⁻⁷	6 . 10 ⁴
	<u>Manteau en Niobium</u>			
	95 Nb	1,55 10 ⁻¹	3 . 10 ⁻⁹	5,2 10 ⁷
	Nb total	7,14 10 ⁻¹	b)	2,4 10 ⁸
	<u>Manteau en Vanadium</u>			
	48 Sc	4,2 10 ⁻³	5 . 10 ⁻⁹	8,4 10 ⁵
	V total	5,51 10 ⁻²	b)	8,6 10 ⁵
LMFBR	I ¹³¹	3,16 10 ⁻²	1,4 10 ⁻¹³	2,3 10 ¹¹
	Pu ²³⁹	6,04 10 ⁻⁵	6 . 10 ⁻¹⁴	1 10 ⁹
	Pu total	1,82 10 ⁻²	b)	8,3 10 ⁹

a) Le risque biologique relatif est obtenu en divisant la radioactivité de l'inventaire par la concentration permise maximum (MPC)

b) Le MPC individuel de chaque isotope est estimé pour obtenir le risque biologique composé

Risques biologiques relatifs résultant de la radioactivité accumulée dans les structures d'un réacteur à fusion (RFR)

(Références 21)

	Déchets	R a d i o a c t i v i t é		M P C a)	Risque biologique b)
		Taux de production (Ci/kW-an)	Accumulée sur 1000 ans (Ci/W(th))		
RFR	<u>Manteau en Nobium</u>				
	Nb 93 m	8,8	0,173	$4 \cdot 10^{-4}$	420
	Nb 94	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-6}$	966
	<u>Manteau en Vanadium</u> impuretés de Nobium				0,14 à 1,4

a) Concentration permise maximum dans l'eau.

b) Le risque biologique relatif est obtenu en divisant la radioactivité accumulée sur 1000 ans par le MPC.

T a b l e XVII

Déchets en composés chimiques, cendres et scories dus à la consommation globale d'énergie et à la production d'électricité, en 10⁶t/an et kg/kW-an

USA 1970

(Références 5,33,39,40,56)

	CO	CO ₂	SO _x	NO _x	C H _x y	Cendres	Scories
10 ⁶ t/an							
global	75	4000	20 - 27	13	20	11 - 26,5	~ 30
Centrales électriques	1,7	-	10 - 22	3,5-9,1	0,6-1,2	2,5- 8,1	~ 30
kg/kW-an							
global	32,6	1740	8,7-11,7	5,65	8,7	4,8- 14,2	10,8 - 16
Centrales électriques	2,8-3,1	-	21,8-35,9	6,4-14,7	1 - 2,2	4,5- 13,2	49

T a b l e XVIII

Déchets en composés chimiques et cendres répartis par secteurs, en 10⁶t/an et kg/kW-an

USA 1970

(Références Tables 4 et 6,5)

	Répartition moyenne		Déchets (10 ⁶ t/an)						Déchets (kg/kW-an)			
	%	10 ⁶ kW	CO	SO _x	NO _x	C _x H _y	Cendres	CO	SO _x	NO _x	C _x H _y	Cendres
Industrie	31	713	2,8	9	2,3	4	6	3,93	12,6	3,22	5,6	8,4
Commerce	7	161	4	4	2	1	1	8,26	8,26	4,13	2,07	2,07
Résidence	14	322										
Transport	24	552	66	1	5,5	13	0,6	119	1,81	9,96	23,5	1,09
Centrales électriques	24	552	1,7	12	3,5	1,2	2,5	3,08	21,8	6,34	2,18	4,53
Total	100	2300	74,5	26	13,3	19,2	10,1					