

Ce livre épuisé en librairie à été adapté pour Internet par Infonucléaire,
des liens en bleu ont été rajoutés.

www.dissident-media.org/infonuclaire

Groupement de **S**cientifiques
pour l'**I**nformation sur l'**E**nergie **N**ucléaire

électro- nucléaire:

DANGER

Adresser toute correspondance à :
GSIN, 2 rue François-Villon, 91400 Orsay

Edition du Seuil, 1977.

Avertissement au lecteur

Scientifiques travaillant dans différents laboratoires et universités, nous avons jugé très partielles les informations diffusées par les pouvoirs publics sur les dangers du programme électronucléaire décidé par le gouvernement en mars 1974. En particulier, le rapport du ministère de l'Industrie et de la Recherche (« rapport d'Ornano »), envoyé en novembre 1974 à tous les élus locaux concernés par des implantations de centrales nucléaires, nous a semblé extrêmement contestable. Des scientifiques de l'université Paris-XI (Centre d'Orsay) ont publié, en mars 1975, une plaquette qui critiquait ce rapport, plaquette intitulée Risques et dangers du programme électronucléaire. Cette étude est aujourd'hui reprise et réactualisée par le « Groupement de scientifiques pour l'information sur l'énergie nucléaire », dont le but est d'informer le public de ce que les différentes instances officielles veulent lui cacher.

Nous donnons ici les grandes lignes de notre étude :

- En introduction, nous présentons les problèmes généraux soulevés par le passage du stade expérimental au stade industriel à grande échelle de la production nucléaire de l'électricité.

- Les chapitres 3, 4, 5, 6 traitent des dangers en fonctionnement normal des centrales nucléaires : complexité de la chaîne suivie par le combustible nucléaire, existence de nombreux effluents radioactifs gazeux ou liquides, pollution thermique massive, aléas du traitement et du stockage des déchets.

- Le chapitre 7 aborde les différentes causes d'accident pouvant entraîner des irradiations et contaminations importantes des populations : accidents propres aux réacteurs PWR ou surgénérateurs, ou bien lors des transports de matières radioactives.

- Dans les chapitres 8 et 9, nous montrons que la diffusion de la pollution radioactive dans l'environnement et dans les systèmes vivants est un phénomène complexe ; il y a là des risques graves pour la santé publique et le patrimoine génétique.

- Nous donnons enfin (chapitres 10, 11, 12, 13) quelques remarques économiques et politiques assez générales, ainsi que les conclusions de notre constat.

Principaux sigles utilisés

Le lecteur se reportera utilement aux pages indiquées entre parenthèses.

Organismes

AEC	Atomic Energy Commission (p. 4).
AIEA	Agence internationale de l'Énergie atomique (p. 10).
CEA	Commissariat à l'Énergie atomique (p. 4).
CERN	Centre européen de recherche nucléaire (p. 3).
CIPR	Commission internationale de protection radiologique (p. 18).
CNRS	Centre national de la recherche scientifique (p. 3).
PEON	(commission) Production d'électricité d'origine nucléaire (p. 57).
SCPRI	Service central de protection contre les rayonnements ionisants (p. 58).

Termes techniques

CMA	Concentration maximale admissible (p. 19).
ECCS	Emergency Cooling Core System (p. 14).
HAO	Haute activité oxyde (p. 12).
HTR	High Temperature Reactor (p. 33).
LOCA	Loss of Cooling Accident (p. 14).
pib	Production intérieure brute (p. 57).
PIB	Produit intérieur brut (p. 57).
PWR	Pressurised Water Reactor (p. 31).
Tec	Tonne équivalent charbon (p. 7).
TNT	Tri-nitro-toluène (p. 29 - 36).

I. Introduction

Pourquoi une nouvelle édition de la plaquette *Risques et dangers du programme électronucléaire* du Groupe des scientifiques d'Orsay ? En 1974, lorsque parut le texte dit « [rapport d'Ornano](#) », présentant sous un jour optimiste et partial le programme nucléaire décidé par le gouvernement Messmer, nous avons rédigé une plaquette qui répondait aux arguments développés par les services de M. d'Ornano. Aujourd'hui, une réactualisation de nos analyses est devenue nécessaire, et un bilan est devenu possible.

En effet, en 1974, [du côté gouvernemental, on était en pleine euphorie : le nucléaire prenait le relais du pétrole](#), il était bon marché, il garantissait l'indépendance énergétique, il ne posait aucun problème ni sur le plan de la sécurité ni sur celui de l'environnement ; il devait enfin permettre un redéploiement industriel sur le marché international.

Sur le plan français, 7 tranches de 1 000 MWé* allaient être construites chaque année, conduisant à l'installation de 50 000 MWé vers 1985, assurant ainsi 70 % de la consommation d'électricité. Or, force est de constater que ce programme ambitieux a été largement remis en cause pour diverses raisons

a. Le jeu combiné de l'érosion monétaire et de la politique systématique de sous-estimation des coûts pratiquée par les instances gouvernementales et la direction d'EDF, a conduit à des retards importants pour des raisons financières. Il y a un an, le gouvernement a donc été contraint de ralentir le rythme de construction (5 tranches au lieu de 7).

b. Le grave problème que constitue le retraitement des déchets, relégué au second plan par le gouvernement, est toujours une pierre d'achoppement pour le programme électronucléaire. La grève, en septembre 1976, des ouvriers du centre de retraitement de La Hague a révélé les erreurs de conception de cette usine et les problèmes de sécurité du personnel.

c. Les prises de position de scientifiques se multiplient, allant du doute jusqu'à une franche opposition au « tout nucléaire ». On peut ici rappeler que, en même temps que la première édition de cette plaquette, il y avait eu en France « [l'appel des 400](#) » (devenus depuis plus de 4 000). Ensuite, on a vu des personnalités comme Lew Kowarski (un de ceux qui, avec Joliot, découvrirent la fission nucléaire) dénoncer les dangers des surgénérateurs, puis des organismes officiels comme la commission de physique nucléaire et corpusculaire du CNRS, ou la commission Recherche du VII^e Plan, prendre des attitudes très critiques vis-à-vis du programme électronucléaire gouvernemental.

Faisant suite aux prises de position des Conseils généraux de l'Isère et de la Savoie, demandant l'arrêt des travaux de construction du surgénérateur Super-Phénix, 1 300 scientifiques du Centre européen de recherche nucléaire (CERN), à Genève, ont pris position contre ce réacteur.

Des prix Nobel aux États-Unis (Urey, Alfvén...) avaient déjà dénoncé les dangers du nucléaire. Tout récemment, [la très officielle commission sur l'Environnement du Royaume-Uni](#) soulignait très clairement un certain nombre de difficultés majeures (déchets, surgénérateurs) que les instances gouvernementales sous-estiment systématiquement de ce côté-ci de la Manche.

d. Enfin, on assiste à une prise de conscience** de plus en plus grande des populations locales directement touchées par des projets d'implantation de centrales nucléaires et qui s'opposent très souvent à ces projets.

Soulignons qu'en Allemagne, cette opposition a conduit les tribunaux de 3 Lands (Rhénanie, Bade-Wurtemberg, Schleswig-Holstein) à décider l'arrêt de la construction de 2 centrales (Whyll, Brokdorf) et à suspendre la construction de l'usine de retraitement de Gorleben (Basse-Saxe).

L'ensemble de ces faits, la réflexion collective qui en a découlé depuis maintenant plus de 2 ans à tous les niveaux, nous amènent aujourd'hui à affirmer, plus résolument qu'à l'époque de l'édition de la première plaquette, notre opposition fondamentale à un développement énergétique d'origine exclusivement nucléaire.

Avant d'aborder les divers problèmes point par point, il nous est apparu nécessaire de reprendre, en les précisant, les remarques que nous faisons il y a 2 ans sur les aspects proprement économiques et politiques du programme nucléaire.

* voir p. 7, au paragraphe Unités de puissance.

** Voir à ce sujet le numéro spécial de *Que choisir* (juin 1977), revue de l'Union fédérale des consommateurs qui a publié un face à face nucléaire entre EDF et diverses organisations contestant le programme français.

1. Prix de revient

EDF continue à affirmer que le prix du kWh nucléaire est toujours compétitif. Cela reste vrai si on le compare au kWh pétrole, encore que la différence se soit amenuisée...

En revanche, ce n'est plus vrai en ce qui concerne le kWh charbon obtenu par gazéification souterraine. Il semble aussi que certaines charges aient été sous-estimées (construction et retraitement) ; d'autres sont difficiles à chiffrer : démantèlement des centrales, stockage des déchets radioactifs. Enfin, le poste le plus incertain est celui du [prix de l'uranium naturel](#), qui a été multiplié par 3 ou 4 ces dernières années et qui, de l'avis des experts, devrait continuer à augmenter rapidement. Alors qu'EDF estime le prix du kWh nucléaire un peu inférieur à 8 centimes (en francs 1976), les autres pays ont des estimations beaucoup moins optimistes. Aux États-Unis, les estimations du coût du kWh nucléaire s'établissent d'ores et déjà autour de 13 centimes (*Revue de l'énergie*, février 1977)*.

Par ailleurs, ces estimations demeurent, pour une grosse part, liées aux normes de sécurité que l'on appliquera dans l'ensemble de l'industrie nucléaire : elles concernent l'extraction et le traitement du minerai, la construction et l'exploitation des centrales, les transports, les effluents radioactifs, le traitement et le stockage des déchets. Ces normes, qui ne tiennent pas compte d'un certain nombre de postes (par exemple les coûts sociaux), sont sujettes à modification. Déjà, on a pu assister à l'abandon de projets d'usines de retraitement du combustible aux États-Unis, par suite du relèvement des normes.

En tout état de cause, ces normes seront-elles toujours respectées ? Les normes actuelles ont été établies à partir de l'expérience acquise auprès de centrales de faible puissance ; pourront-elles être maintenues lorsque l'on passera aux [170 000 MW d'origine nucléaire, prévus en l'an 2000](#), avec [une optique de rentabilité et de compétitivité](#) ?

L'expérience d'autres industries (PUK, industrie chimique, etc.) ne nous incite pas à croire que les normes actuelles seront effectivement respectées dans l'industrie nucléaire, d'autant plus qu'avec la privatisation accrue des techniques nucléaires (Cogema, Novatome...), la pression des intérêts privés et de la rentabilité se fera plus vive.

* Les toutes dernières estimations du kWh nucléaire français tournent autour de 10 centimes.

2. Indépendance nationale

Un des arguments majeurs avancés par les partisans du « tout nucléaire », est celui de l'indépendance énergétique ; Qu'en est-il ?

a. Du point de vue technologique, la France a abandonné, en 1969, la filière graphite-gaz, développée par le CEA, pour adopter la filière à eau légère sous licence américaine (Westinghouse). L'exploitation par les constructeurs de centrales, puis par EDF, de cette licence les amène à être en fait dépendants de Westinghouse : ainsi, certaines parties de la licence sont couvertes par le secret industriel. On a vu récemment un exemple de cette situation à Fessenheim, où la soudure de manchons thermiques n'a pu se faire qu'approximativement du fait de l'absence de cotes sur les plans fournis par le constructeur !

b. Du point de vue de l'approvisionnement, le choix de la filière américaine impose aussi le recours à l'uranium enrichi, fourni en totalité actuellement par les États-Unis et l'URSS. Les Américains, pour leur part, imposent des conditions draconiennes à la livraison d'uranium enrichi : livraison 8 ans après la commande, paiement d'avance à un prix fixé unilatéralement par eux. Il y a d'ailleurs une très forte demande en uranium enrichi sur le marché mondial, et les investissements prévus aussi bien en Europe (Eurodif, Urenco, puis Coredif) qu'aux États-Unis ne suffiront pas à satisfaire les besoins prévisibles en ce précieux métal. La France, pour sa part, restera certainement tributaire du marché mondial de l'uranium enrichi.

c. Du point de vue de l'approvisionnement en uranium naturel, la France contrôle actuellement 10 % du marché mondial, essentiellement dans les anciennes colonies françaises en Afrique (Gabon, [Niger](#), République centrafricaine). Dans ces conditions, 50 % de ses besoins actuels sont couverts par de l'uranium extrait en métropole**. Cette situation pourrait évoluer comme celle du pétrole, c'est-à-dire vers la reprise en main par les pays producteurs eux-mêmes de leurs propres richesses minières. Aussi, il serait naïf de croire, comme on l'a fait jusqu'en 1973 pour le pétrole, que l'uranium restera à son prix actuel.

d. Du point de vue financier, le développement rapide du nucléaire en France se réalise grâce à des emprunts considérables auprès de bailleurs de fonds internationaux, notamment américains.

e. Du point de vue politique, le gouvernement français pensait avoir les coudées franches pour exporter sa propre technologie nucléaire. On a assisté à un certain nombre de péripéties entre les États-Unis et la France, à propos de la livraison d'usines de retraitement à la Corée du Sud et au Pakistan. Les États-Unis, craignant une prolifération d'armes nucléaires échappant à leur contrôle, ont multiplié les pressions pour remettre en question ces marchés. En décembre 1976, le gouvernement français a dû renoncer à passer de nouveaux contrats, ce qui par ailleurs nous semble un point positif.

Tous ces faits montrent qu'il est illusoire de parler d'indépendance nationale à propos du nucléaire.

** La fermeture de la dernière mine française date de 2001, [ces mines ont produit des centaines de millions de tonnes de déchets radioactifs](#).

3. Expérience scientifique et technique du CEA

Il est certain que le CEA a acquis, au cours des 20 dernières années, une très grande compétence dans le domaine des réacteurs ; mais la filière américaine choisie n'entre pas dans son domaine d'étude.

De plus, le CEA n'en est pas le maître d'œuvre, les constructions étant prises en charge par des sociétés privées (Novatome, Framatome, Technicatome).

Pour ce qui concerne les surgénérateurs, on remarquera que l'expérience du CEA s'arrête au stade du prototype ; il existe actuellement deux surgénérateurs (URSS et Grande-Bretagne) de puissance comparable à celle de Phénix (250 à 350 MWé) ; quelques autres sont en construction, de puissance voisine.

Cependant, on constate partout une extrême prudence dans tous les projets de développement des surgénérateurs, et même des retards dans les prises de décision. Nous sommes les seuls à nous lancer dans un projet de la taille de Super-Phénix (1 200 MWé), alors qu'on n'a aucune expérience des surgénérateurs au plan industriel ! De plus, EDF a des projets de surgénérateurs d'au moins 1 800 MWé dans la région de Chalon. Tout ce développement se réalisera sans le CEA, avec recours au privé (Novatome).

4. Problèmes techniques

Nous aborderons, dans ce paragraphe, les problèmes techniques tels que le rapport d'Ornano les posait en 1974 ; les justifications gouvernementales restent actuellement les mêmes.

1. La radioactivité

Le rapport d'Ornano discute très longuement de la radioactivité naturelle, dans le but évident de laisser croire que la toxicité radiologique des produits manipulés par l'industrie nucléaire est comparable à celle des radioéléments existant à l'état naturel. Il précise que les appareils de mesure n'enregistrent qu'une faible augmentation de la radioactivité dans le voisinage immédiat des centrales ; cette affirmation n'a de sens que si l'organisme humain se comporte, vis-à-vis du milieu, de la même façon que l'appareil de mesure en question : l'argumentation du ministre néglige, en particulier, les phénomènes de contamination et de concentration biologiques, très difficiles à estimer ; la notion même de [dose maximale admissible](#) est sujette à caution et encore très controversée.

2. La radioprotection

La suite du rapport nous apprend qu'en matière de radioprotection aucune technique permettant de protéger valablement la population contre une libération excessive de produits radioactifs n'est envisageable ; l'utilisation du terme de radioprotection laisse croire à l'existence d'un dispositif de protection susceptible d'empêcher toute contamination de la population alors qu'il ne s'agit que d'un système de mesure et de surveillance de la radioactivité. Il nous semble de plus inacceptable que le SCPRI (Service central de protection contre les rayonnements ionisants) [tienne secrètes les publications](#) sur la contamination de l'environnement, alors que c'est le seul [service officiel](#) à faire ces contrôles.

3. Les accidents

A ce sujet, le rapport conclut à une impossibilité quasi totale d'un [accident majeur](#), résultant de la fusion thermique du cœur du réacteur par suite d'un manque de fluide refroidissant. Il se base essentiellement sur [le rapport du Pr Rasmussen](#), en négligeant ceux d'autres experts qui arrivent à des conclusions moins optimistes. Pour notre part, nous ne sommes pas en mesure de prendre parti, mais ce qu'on peut assurer c'est que le système de refroidissement de secours des centrales adoptées par EDF ne fonctionne pas de façon satisfaisante, et que si tout ou partie des produits de fission et d'activation contenus normalement dans le cœur du réacteur étaient répandus dans l'environnement immédiat d'une centrale, les conséquences en seraient catastrophiques et irrémédiables. En ce qui concerne [les surgénérateurs](#), la possibilité d'[explosion nucléaire](#) du cœur du réacteur est explicitement reconnue par le CEA. En matière de prévention des accidents, on se limite donc, comme l'indique le rapport, à faire confiance aux études qui sont réalisées actuellement, en oubliant le caractère essentiellement imprévisible d'un accident.

4. Les déchets

Le rapport de M. d'Ornano ne peut ignorer que tous [les problèmes ne sont pas résolus](#), en particulier celui des déchets radioactifs à vie longue ; le point important à ce sujet est de donner une mesure de la quantité

des déchets produits, de leur nocivité et du temps nécessaire à leur complète désactivation. Sur ce plan, le rapport présente des lacunes extrêmement graves : il ne donne qu'une évaluation imagée du volume des déchets produits en l'an 2000 - qui pourraient, selon lui, tenir dans deux piscines de taille moyenne.

Nous notons que ce rapport ne mentionne jamais une mesure de radioactivité en curies, unité de mesure habituellement utilisée, lorsqu'il traite de l'activité des déchets ou des effluents radioactifs, mais qu'il l'exprime en termes de pourcentages ; ainsi, page 27, il est écrit : « Après avoir séjourné à la centrale quelques mois, pendant lesquels leur radioactivité décroît de 98 %, les éléments combustibles usés sont évacués dans des conteneurs blindés vers une usine de traitement », mais il n'est pas précisé que la radioactivité contenue dans les 2 % restants est encore de quelques dizaines de millions de curies, chiffre que l'on peut comparer aux radiosources médicales internes* dont l'activité est de quelques millièmes de curies (millicuries) ou aux concentrations maximales admissibles des radioéléments dans le corps humain, qui sont de quelques microcuries**.

Le rapport affirme plus loin que 1 à 2 % du plutonium 239 produit dans le cœur du réacteur se retrouvent dans les déchets radioactifs stockés, en passant sous silence que 0,5 % se perd dans le processus de séparation chimique à l'usine de retraitement, et échappe ainsi à tout contrôle ceci correspond à une perte de 1 kg de plutonium environ par 1 000 MWé et par an ; or, le plutonium est un produit très dangereux de l'industrie nucléaire, dont la toxicité apparaît à partir de l'absorption de quelques microgrammes. Tout cela, le rapport ne le mentionne pas.

Ce rapport, donc, ne précise ni la quantité des déchets produits, ni leur toxicité. Il se contente de vœux pieux quant au procédé de stockage et à la durée de celui-ci.

* En radiothérapie des cancers de la langue, du palais, de l'utérus, on utilise des aiguilles de radium (^{226}Ra) de 1,4 mg chacune (1,4 millicurie) ; on en place de 4 à 7 pendant 5 à 7 jours dans le voisinage de la tumeur, ce qui détruit plusieurs cm^3 de tissus. La dose d'irradiation reçue localement peut atteindre 7 500 rads (1 rad ~ 1 rem).

Dans la thérapeutique du cancer de la thyroïde, on utilise parfois l'iode radioactif (^{131}I) ; la quantité mise en œuvre correspond à 15 millicuries ; cette source détruit un nodule de 2 cm de rayon dans la thyroïde ; on ne l'utilise qu'avec de très grandes précautions.

** La concentration maximale admissible de radioéléments dans tout le corps humain varie entre le millicurie (mCi) et le microcurie (μCi).

Exemples :

^3H Tritium	1	mCi	soit 1000 μCi
^{14}C Carbone 14	0,3	mCi	soit 300 μCi
^{32}P Phosphore 32	0,006	mCi	soit 6 μCi
^{60}Co Cobalt 60	0,01	mCi	soit 10 μCi
^{131}I Iode 131	0,0007	mCi	soit 0,7 μCi

5. Démantèlement

En ce qui concerne le **démantèlement** des centrales **après 20 ans de fonctionnement**, nous notons qu'il n'est envisagé qu'une simple extrapolation des techniques utilisées lors de la remise en état des réacteurs ; en fait, le démantèlement total doit être prévu dès la conception du réacteur, sinon son coût sera prohibitif - d'autant que les problèmes d'irradiation du personnel et de contamination de l'environnement sont d'un autre ordre que lors d'une réparation courante.

Il ne s'agit pas d'incriminer le travail qui a été fait au CEA pendant de longues années, mais de souligner toutes les difficultés du projet gouvernemental ; les problèmes que pose le développement massif de l'industrie nucléaire sont extraordinairement difficiles à résoudre ; ils n'ont trouvé, à ce jour, aucune solution satisfaisante ni en France, ni ailleurs, et risquent de conduire à une détérioration croissante et quasi définitive du milieu dans lequel nous vivons.

2. Définition de quelques termes techniques

Nous donnons ci-dessous la définition de quelques termes techniques apparaissant dans le texte ; ceci est aussi une petite introduction aux processus physiques qui se déroulent dans une centrale nucléaire.

Noyau atomique : les atomes sont constitués d'un cœur dense, dit noyau, entouré d'un nuage d'électrons beaucoup plus légers. La physique nucléaire est l'étude des propriétés des noyaux atomiques.

Neutrons, protons : les noyaux sont composés de deux types de particules ; les unes, les protons, ont une charge électrique positive, les autres, les neutrons, n'ont pas de charge électrique. Ainsi, le noyau d'uranium 238 comprend 92 protons et 146 neutrons.

Radioactivité : les noyaux des corps radioactifs (comme l'uranium, le plutonium, etc.), contrairement à ceux des corps stables (tels que l'oxygène 16, le carbone 12, etc.), se transforment et se désintègrent spontanément au cours du temps en émettant un rayonnement d'origine nucléaire. C'est ce qu'on appelle la radioactivité.

Fission : c'est la cassure d'un noyau atomique, naturelle ou provoquée par un projectile nucléaire, neutron par exemple, cette cassure est accompagnée d'un grand dégagement d'énergie et c'est cette énergie qui est utilisée dans les réacteurs nucléaires pour la production d'électricité.

Période : la période d'un corps radioactif est le temps au bout duquel la moitié des noyaux d'un échantillon de ce corps se sont désintégrés ; cette période caractérise chaque corps radioactif. Il faut attendre 10 périodes pour que le nombre de noyaux radioactifs présents initialement dans un matériau soit divisé par 1000 ($2^{10} = 1024$).

Activité : l'activité d'un matériau radioactif est le nombre moyen de désintégrations par seconde se produisant dans ce matériau.

Curie : c'est l'unité qui sert à mesurer l'activité radioactive. Un curie (Ci) correspond à 37 milliards de désintégrations par seconde ; c'est environ l'activité d'un gramme de radium 226.

Rad : tandis que le curie mesure le nombre de désintégrations par seconde, le rad est l'unité de mesure du rayonnement reçu par un corps inerte ou vivant. C'est la dose de rayonnement nucléaire correspondant à l'absorption d'une énergie égale à un centième de joule par kilogramme de matière (1 watt = 1 joule par seconde).

Rem : le rem est une quantité proportionnelle au rad mais qui tient compte des effets biologiques variables suivant la nature du rayonnement. Cette unité est calculée et non mesurée. Pour obtenir la dose reçue en rems, on multiplie la dose reçue en rads par un certain coefficient. Ainsi : 1 rad correspond à 1 rem pour les rayons X ou γ , et à 10 rems pour les rayons α . Dans le cas des rayons α du plutonium 239, lorsqu'il est fixé sur le squelette, 1 rad correspond à 50 rems.

Activation : les neutrons produits abondamment dans les réacteurs peuvent également induire des transmutations nucléaires d'éléments chimiques stables entrant dans la composition des matériaux constitutifs du réacteur (métaux, liquides, béton). Ces transmutations conduisent généralement à des corps radioactifs appelés produits d'activation.

Unités de puissance : la puissance d'un réacteur se chiffre en mégawatts (MW) (un mégawatt = un million de watts). Les réacteurs prévus atteindront une puissance d'un gigawatt (GW), c'est-à-dire 1 000 MW. Il faut distinguer la puissance thermique produite dans le réacteur au cours de la fission et la puissance électrique fournie au réseau qui est seulement 30 % de la précédente. Dans le texte, pour bien faire cette distinction, nous préciserons mégawatt électrique (MWé) ou mégawatt thermique (MWth).

Unités d'énergie : l'unité la plus souvent utilisée est le tec (tonne-équivalent-charbon), qui est l'énergie thermique fournie par la combustion complète d'une tonne de charbon. Ainsi l'énergie fournie par la combustion d'une tonne de pétrole correspond à 1,5 tec.

Réacteur PWR : réacteur nucléaire utilisant la fission de noyaux d'uranium 235 (^{235}U) comme source de

chaleur pour la production d'électricité. Le fluide caloporteur est de l'eau sous pression, d'où le nom de ces réacteurs (*Pressurised Water Reactor* = réacteur à eau sous pression).

Réacteur surgénérateur : réacteur nucléaire utilisant la fission de noyaux d'uranium 235 et/ou de noyaux de plutonium 239 (^{239}Pu) comme source de chaleur pour la production d'électricité. Le combustible de ces réacteurs est constitué d'un mélange de plutonium 239 (^{239}Pu) et d'uranium 238 (^{238}U). Par réaction nucléaire, une partie de l'uranium 238 est transformée en plutonium 239, d'où le nom de réacteurs « surgénérateurs » : ces réacteurs génèrent une partie de leur propre élément combustible à partir de l'uranium 238.

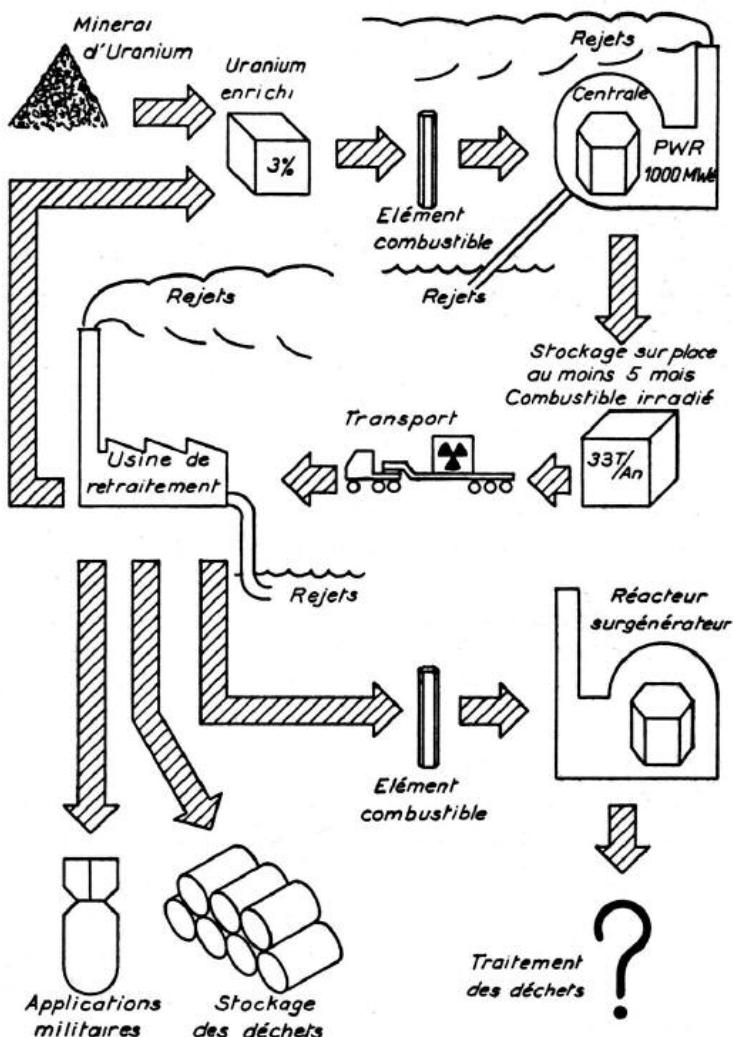
Multiples et sous-multiples des unités.

Nom	Abréviation	Signification
Milli	m	1/1 000 = un millième
Micro	μ	1/1 000 000 = un millionième
Pico	p	un millionième de millionième
Nano	n	un milliardième
Kilo	k	1 000 = mille
Méga	M	1 000 000 = un million
Giga	G	1 000 000 000 = un milliard

Par exemple :

1 mCi (millicurie) = un millième de curie
 1 Mtec (mégatec) = un million de tec

3. Chaîne suivie par le combustible nucléaire



4. Pollution radioactive d'une centrale nucléaire PWR en fonctionnement normal

« Les rejets des centrales sont peu abondants et faiblement radioactifs. » C'est ce qu'affirme le rapport officiel en décrivant **les barrières successives** qui isolent le combustible de l'extérieur. Ceci est très optimiste pour plusieurs raisons :

- La première barrière, celle qui est censée contenir parfaitement la matière fissile, n'est pas étanche : les gaines des barreaux sont constituées d'un alliage métallique ; or, cet alliage, si bien étudié soit-il, se fragilise sous l'effet des radiations, des hautes températures et des gaz dégagés par la matière fissile. C'est ainsi que, jusqu'à maintenant, on a toujours constaté que des fissures apparaissaient sur les gaines de combustibles. Les normes officielles tolèrent qu'en marche normale 1 % des gaines soient fissurées.

- D'autre part, le flux de neutrons émanant de l'élément combustible provoque l'apparition de produits radioactifs dans le métal de la gaine. Or, le fluide du circuit primaire, qui est constitué d'eau à haute température (plus de 300 °C) et de divers produits chimiques, est corrosif et attaque la surface de cette gaine. Une partie des produits d'activation se retrouve donc dans le fluide et contribue à sa contamination. Si l'on en croit le rapport d'Ornano, cela a peu d'importance, car cet ensemble est contenu dans une enceinte bétonnée baptisée « enceinte de confinement ». Cependant, il est nécessaire de traiter chimiquement l'eau du circuit primaire ; ce traitement est fait hors de l'enceinte, dans les bâtiments annexes du réacteur, par passage sur filtres et résines échangeuses d'ions, qu'il faut changer périodiquement. Les déchets résultants représentent environ 100 m³ par an pour une tranche de 1 000 MWé, soit 400 fûts de béton pour un réacteur PWR, qui sont stockés sur place. Par ailleurs, les fuites du circuit primaire (environ 4 tonnes par mois), les divers produits d'entretien et les drains de planchers conduisent à traiter entre 5 000 et 15 000 m³ par an d'effluents radioactifs liquides ou solides. Ce traitement libère des gaz radioactifs.

1. Effluents gazeux

Parmi ceux-ci, il faut distinguer deux types de rejets, car ils posent des problèmes de sécurité très différents.

1. Les effluents à vie brève

Ces gaz ont des périodes extrêmement courtes (7,4 secondes pour l'azote 16) ou courtes (5 jours pour le xénon 135). Cela signifie qu'ils se désactivent beaucoup en quelques jours, et donc que leur activité est très grande pendant ces quelques jours.

Il s'agit principalement de gaz inertes et de leurs produits de désintégration :

- azote de masse atomique 13 et 16 ;

- gaz rares :
argon 41
krypton 87
krypton 85 excité
krypton 83 excité
krypton 88
krypton 89
xénon 135

- rubidium 88 et 89.

Leur activité est telle qu'il est prévu de les stocker un certain temps en cuves avant de les relâcher dans l'atmosphère. Ce temps de « refroidissement » (35 jours en France) est contesté par les spécialistes eux-mêmes : les Allemands ont adopté un délai 2 fois plus long. L'activité estimée de ces rejets est de 35 000 Ci par an pour 1 000 MWé.

La présence de ces gaz constitue un danger important pour la population voisine. En cas d'incident de manipulation de ces produits, ceux-ci se désintègrent en effet dans les environs immédiats de la centrale, et une étude anglaise a montré que la dose de radiations absorbée au niveau des organes de reproduction de l'homme est 5 000 fois plus importante à 10 km de la centrale qu'à 100 km (même lorsque ces produits sont rejetés par des cheminées de 30 m de haut ou plus).

2, Les effluents à longue durée de vie

Ces produits gardent une activité importante durant des décennies. Certains envahissent l'ensemble de l'atmosphère, comme le krypton 85. D'autres, comme le tritium et l'iode 129, remplacent dans les éléments naturels l'hydrogène et l'iode non radioactifs et se transportent à travers les chaînes alimentaires jusqu'à l'homme. L'activité annuelle de ces produits est de quelques centaines de curies. L'iode 129, en particulier, bien qu'il contribue faiblement à l'activité globale des effluents rejetés, constitue un danger important par ses grandes capacités de reconcentration. Une partie de ces rejets est fixée dans des filtres chimiques et les autres, notamment le tritium et le krypton 85, sont purement et simplement rejetés dans l'environnement malgré leur longue durée de vie.

2. Effluents liquides

A l'issue de la même chaîne de traitement, des effluents liquides sont rejetés dans l'environnement (fleuves ou mers).

Le corps le plus abondamment rejeté est le tritium : par exemple, un réacteur PWR américain de 600 MWé a rejeté annuellement 12 000 Ci de tritium sous forme d'eau tritiée. EDF prévoit des rejets annuels de 1 000 Ci pour 1 000 MWé. De nombreux autres corps sont rejetés, comme le cobalt 60, le strontium 90, l'iode 131 et 133, le césium 135 et 137, avec une activité globale annuelle de 10 Ci.

Ces éléments ont en commun de se retrouver tous dans les aliments que nous absorbons, en concentration d'autant plus grande que les eaux de refroidissement sont déjà polluées chimiquement et thermiquement. Nous reviendrons plus loin sur cet effet d'amplification naturelle entre les trois pollutions.

En résumé, s'il est vrai que « les rejets des centrales sont peu abondants et faiblement radioactifs », il est faux d'en déduire que les conséquences possibles sur l'homme sont négligeables.

5. Problème des rejets d'eau

La pollution thermique résultant de l'implantation des centrales nucléaires au bord des cours d'eau et sur le littoral n'est pas qualitativement différente de celle provenant des centrales classiques, cependant il faut souligner une nette différence quantitative due principalement

a. Au rendement des centrales nucléaires actuellement choisies (PWR), qui est de l'ordre de 30 % alors que celui des centrales classiques (charbon, fuel, gaz) varie entre 40 et 45 %. Ainsi, par kWhé produit, une centrale nucléaire rejette 1 650 kcal au condenseur, alors que la centrale thermique rejette 1 000 kcal à la source d'eau froide et 250 kcal à la cheminée. Cela représente tout de même une augmentation de 65 % de la pollution thermique de la source froide.

b. Au regroupement, nécessaire dans le cas des centrales nucléaires, de plusieurs tranches (de 2 à 4 réacteurs de 1 000 MWé) sur un même site, alors que la plupart des centrales classiques produisent en moyenne 800 MWé.

Ignorée et sous-estimée jusqu'à maintenant, la pollution thermique, s'ajoutant à une pollution chimique grandissante, commence à poser des problèmes. La période de sécheresse de l'été 1976 a montré qu'il n'était pas possible avec le parc actuel de centrales de faire face aux demandes, non que les centrales soient en nombre insuffisant, mais parce qu'il a été nécessaire de réduire très sensiblement leur puissance par suite du [manque d'eau froide](#).

Il est clair qu'une diversification des sources d'énergie est une nécessité et qu'en particulier il est absurde de transformer la chaleur du cœur du réacteur nucléaire en électricité, si c'est pour retransformer celle-ci, après transport, en chaleur pour le chauffage domestique (rendement global : environ 25 %!).

La pollution thermique soulève des problèmes au niveau et de l'environnement physique et du milieu biologique.

1. Besoins en eau et conséquences des rejets sur l'environnement physique

En circuit ouvert, pour 1 000 MWé, il faut disposer d'un débit de 50 m³/s pour une température ajoutée au condenseur de 10 °C. A part le bord de mer, seuls le Rhône et le Rhin peuvent être envisagés, or, ils sont déjà très sollicités par les industries chimiques et l'agriculture. En ce qui concerne le Rhône, il est déjà soumis à un prélèvement de 7 giga-m³/an sur un débit de 49 giga-m³/an, et si l'on réalisait tous les projets de centrales nucléaires, on en arriverait à transformer en vapeur d'eau entre 5 et 20 % de son débit! Si l'on en croit EDF, la température finale du Rhône en l'an 2000 pourrait atteindre 30 °C en été (installation de 7 200 MWé).

En circuit fermé, avec tour de refroidissement, 3,5 m³/s sont encore nécessaires, dont 3 m³/s sont rejetés, élevés de 15 °C, et l'évaporation dans la tour est de 0,5 m³/s (tous ces chiffres sont donnés pour 1 tranche de 1 000 MWé). L'expérience actuelle ne permet pas d'affirmer qu'une telle évaporation sera sans effet sur le climat et la pluviosité locale; en effet, les seules données viennent de sites industriels qui, le plus souvent, dégagent de la chaleur sèche dont l'influence est très différente sur le climat, alors que les centrales rejettent de la chaleur humide.

Il y a également un conflit avec les besoins de l'agriculture : on utilise, en France, 300 millions de m³/an pour l'irrigation. En 1985, les centrales classiques et nucléaires devront évaporer 220 millions de m³ d'eau. Les besoins de l'agriculture ne sont pas encore chiffrés à cette date, mais ne peuvent que croître par rapport à la situation actuelle. Un grave [problème d'approvisionnement d'eau](#) va donc se poser prochainement.

2. Conséquences sur le milieu vivant

1. Effets mécaniques

L'importance des prélèvements en mer se traduit par le pompage et le rejet, pour 4 tranches de 1 000 MWé, de 200 à 250 m³/s, soit le débit moyen de la Seine à Paris. Cela exige d'énormes canalisations (approximativement le diamètre d'un tunnel de métro) qui débouchent loin en mer (1 500 m environ), soit pour tenir compte des marées, soit pour pomper de l'eau froide (Méditerranée). On connaît mal les courants et la sédimentation littorale. Les fonds marins vont être bouleversés et les cycles biologiques modifiés. Enfin, les organismes vivants aspirés au niveau de la prise d'eau sont détruits, cela d'autant plus qu'ils sont plus grands (d'où le nom de « réacteur requin » donné à certains réacteurs américains).

2. Effets thermiques

Le mélange des eaux chaudes et froides s'effectue avec d'autant plus de difficulté que l'écart thermique est grand (densités et viscosités éloignées), ce qui entraîne la formation de courants chauds (phénomène particulièrement grave dans les fleuves).

D'une manière générale, les alevins sont plus sensibles que les organismes planctoniques. Le zooplankton, qui se régénère moins vite, est plus sensible que le phytoplancton.

L'échauffement des eaux diminue leur teneur en oxygène, et augmente en outre la demande en oxygène de la part des êtres vivants : au voisinage de 20 °C, de 10 % par degré d'échauffement.

L'accélération des réactions biochimiques n'a pas que des aspects négatifs, car on pourrait substituer une espèce à l'autre. Mais, même si on peut réaliser [des élevages rapides](#) (crevettes, huîtres), d'autres problèmes se posent si leur nourriture est détruite. Par ailleurs, les variations brutales de température sont très défavorables à certaines espèces (EDF prévoit 17 arrêts par an et par réacteur).

Enfin, en milieu aquatique peu renouvelé et mal oxygéné, des pollutions microbiennes et virales à tendance anaérobie et thermophile peuvent être favorisées. Elles sont souvent pathogènes pour l'homme.

3. Effets chimiques

Pour lutter contre la [prolifération d'organismes](#) tels que les moules, on pense utiliser du chlore, ce qui représente, à la dose de 0,7 partie pour mille, 3 tonnes en 24 heures. Une [pollution chimique](#) est donc à craindre. A cela on peut ajouter que l'échauffement des eaux augmente la toxicité de certains résidus chimiques comme le phénol. Tous les phénomènes de synergie (interaction et amplification) entre les pollutions chimique et thermique peuvent aboutir à des situations catastrophiques.

6. Le retraitement des combustibles irradiés et le stockage des déchets

Un réacteur nucléaire, comme toute centrale thermique, produit essentiellement deux choses : de l'énergie thermique transformée en énergie électrique et des « cendres ». Mais, dans ce cas, les « cendres » sont des barreaux d'oxyde d'uranium, dont la teneur en matériau fissile (c'est-à-dire l'uranium 235 et le plutonium 239) est si faible qu'ils deviennent impropres à la « combustion » nucléaire. En revanche, ces barreaux, appelés combustibles irradiés, sont extrêmement radioactifs. Ils contiennent essentiellement trois types de radioéléments : les produits de fission résultant de la cassure des noyaux d'uranium 235, le tritium provenant de la fission ternaire et, enfin, des éléments lourds, les transuraniens qui proviennent de transformations successives de l'uranium 238 par capture de neutrons à l'intérieur du réacteur. Les produits de fission se caractérisent par des périodes relativement courtes (par exemple 30 ans pour le césium 137 ou le strontium 90) et par leur émission β , tandis que les transuraniens, dont le plus connu est le plutonium 239, sont généralement émetteurs α et de période longue (24 000 ans pour le plutonium 239), et présentent une toxicité analogue à celle du plutonium. En plus de ces radioéléments, les combustibles irradiés contiennent évidemment de l'uranium (à 1 % en uranium 235).

Le retraitement constitue un ensemble d'opérations mécaniques et chimiques visant à séparer dans ces combustibles irradiés : le plutonium qui peut servir à des fins militaires (bombes) ou civiles (surgénérateur...), l'uranium que l'on renvoie à l'usine d'enrichissement et, enfin, les produits de fission que l'on doit stocker. Le retraitement est une opération très délicate sur le plan industriel et qui a fonctionné en France essentiellement pour les combustibles des centrales graphite-gaz. Le développement des centrales à eau légère (PWR) va considérablement aggraver les problèmes car on aura affaire maintenant à des combustibles 5 à 10 fois plus radioactifs que ceux provenant de la filière graphite-gaz. En France, il est prévu d'effectuer ce retraitement à l'usine de [La Hague](#) (Manche). L'atelier haute activité oxyde (HAO) destiné aux combustibles des PWR a démarré en juin 1976 avec le retraitement de 12 tonnes de combustibles irradiés. Il est prévu de passer progressivement à 800 tonnes par an vers 1980.

Enfin, quant au retraitement du combustible des surgénérateurs, environ 15 fois plus radioactif que celui de la filière graphite-gaz, aucun procédé industriel n'est encore au point.

Le retraitement pose des problèmes sur le plan social et politique, et sur le plan de l'environnement.

1. Sur le plan social et politique, on peut noter que le gouvernement français a choisi de considérer cette activité comme n'importe quelle autre activité industrielle, susceptible de rapporter des profits. En effet, la France est actuellement le seul pays au monde sur le point de procéder au retraitement du combustible de réacteurs PWR : les États-Unis ont récemment abandonné cette idée, craignant de ne pouvoir contrôler la dissémination du plutonium, et ils ont décidé de [stocker les combustibles irradiés tels quels](#). Ce stockage, à long terme, présente probablement des inconvénients plus graves que le retraitement. Il existe de ce fait une forte demande mondiale de retraitement, et la France entend bien y répondre. D'où un premier danger une industrie présentant de gros risques, à technologie délicate, où la sécurité devrait primer tout, est soumise à la loi du profit. Ceci s'est traduit récemment par la création d'une filiale privatisée du CEA, la Cogema, chargée précisément de la commercialisation des services de retraitement. L'introduction de critères de rentabilité est directement responsable du mauvais état actuel de l'usine de La Hague ([de nombreuses zones sont déjà contaminées](#), à telle enseigne que le port d'une tenue étanche, le « shaddock », est obligatoire pour ceux qui y travaillent), ainsi que de la mise en route hâtive de l'atelier HAO en juin 1976. Face à cette situation, les travailleurs du centre de La Hague, directement touchés par cette politique, se sont mis en grève en septembre 1976.

2. Sur le plan de l'environnement, le retraitement est probablement, avec l'extraction de l'uranium, une des activités les plus polluantes du [cycle industriel du combustible nucléaire](#). En effet, cette opération s'accompagne d'importants rejets radioactifs gazeux et liquides

a. [La totalité du krypton 85](#), d'une période de 10 ans, est rejetée par la cheminée à raison de 380 000 Ci pour 33 tonnes retraitées, ce tonnage représentant la quantité de combustibles irradiés retirée annuellement d'un réacteur PWR de 1 000 MWé. On compte donc que d'ici 1980, on aura un rejet de 7 millions de Ci de krypton 85 et, compte tenu de sa période, il y aura accumulation avec possibilité de reconcentration au niveau industriel (usines à air liquide, à lampes au krypton), ce qui est inacceptable pour la santé des travailleurs de ces usines. En revanche, si ce gaz est parfaitement dilué dans l'atmosphère, il ne devrait pas, par irradiation externe, poser de problème. Un pari est cependant pris quant aux possibilités d'irradiation interne, car on connaît actuellement très mal le taux de fixation de ce gaz dans les organismes vivants.

b. La totalité du tritium, à raison de 600 000 Ci/an vers 1980, sera rejetée dans la mer : [on mise sur une parfaite dilution du tritium](#) dans l'eau et sur sa présence sous forme d'eau tritiée. Là encore, un pari est pris, car on sait déjà que le tritium peut se fixer dans des molécules organiques et remonter ainsi jusqu'à l'homme par le biais de reconcentrations dans les diverses chaînes alimentaires.

c. L'iode 131, très dangereux, est en principe retenu.

d. Parmi les effluents liquides, il y a un certain nombre d'émetteurs β , césium 137, strontium 90, ruthénium 106 par exemple, celui-ci étant particulièrement nocif.

C'est ce dernier corps qui est pour l'essentiel responsable de l'augmentation spectaculaire de la radioactivité dans certaines algues et certains crustacés, telle qu'elle ressort des mesures effectuées ces dernières années par le centre de La Hague. C'est également le ruthénium 106 qui fut responsable de [la contamination constatée en 1973](#) chez des populations côtières du pays de Galles, à la suite de rejets de l'usine anglaise de [Windscale](#). Dans ce dernier cas, la zone contaminée était à plus de 100 km au sud de Windscale.

e. Tout au long des processus chimiques, il y a perte de plutonium. A ce sujet, l'usine de La Hague retraitera un poids de plutonium égal à 1 % environ du tonnage de combustible irradié. Ceci veut dire que vers 1980, 8 tonnes par an de plutonium seront extraites à l'usine de La Hague. Il est couramment admis par les responsables de ces opérations au CEA que l'on rejette environ 1 pour 10 000 de plutonium dans l'environnement. Ceci représentera à partir de 1980 une quantité de 800 g environ de plutonium par an pour la seule usine de La Hague. Ce chiffre est considérable, car, exprimé en curies, il dépasse très largement le taux de rejet α (90 Ci) autorisé actuellement par arrêté préfectoral. Ce plutonium se retrouvera en grande partie dans la mer et il y a fort à parier que la direction de La Hague se débrouillera, plutôt que de tendre vers un rejet nul, pour obtenir une révision de l'arrêté préfectoral de sorte que celui-ci cadre avec la « réalité ».

f. Sur une échelle de temps plus longue, enfin, il y a le grave problème des déchets de haute activité. Au bout de la chaîne, les produits de fission se retrouvent sous forme de solutions aqueuses. Celles-ci sont actuellement stockées dans des cuves en inox à double paroi. Elles sont perpétuellement agitées car elles dégagent environ 200 kW/m³ après 10 ans de stockage. Ces solutions aqueuses comprennent de plus la totalité des transuraniens plus lourds que le plutonium, à savoir l'américium et le curium, ainsi que 0,5 % environ de plutonium. Ces solutions doivent être conservées d'une manière rigoureuse pendant plusieurs dizaines de milliers d'années. En effet, au bout de 800 ans, la radioactivité due aux produits de fission est parvenue à un niveau raisonnable. Mais la radioactivité due aux transuraniens est alors dominante, sur des échelles de temps se comptant en milliers d'années. Aussi certains songent-ils à reprendre ces solutions de manière à procéder à une séparation très poussée de ces transuraniens. Cette possibilité est actuellement lointaine sur le plan industriel, et il n'est pas évident que les opérations chimiques qu'il faudrait pour cela mettre en œuvre ne produiraient pas une quantité considérable de résidus, solvants, etc., très actifs qu'il faudrait de nouveau stocker. En ce qui concerne la politique actuelle du CEA, on ne compte pas procéder à une telle séparation. En revanche, on s'oriente vers un procédé de reconcentration de ces solutions (~ 5 000 Ci/litre) puis de vitrification. Les verres ainsi constitués seraient déposés dans des formations géologiques dites stables. Or, personne actuellement ne peut assurer la conservation de ces verres pendant des siècles en raison de la création dans le verre de défauts par rayonnement, de la migration de radioéléments de l'intérieur de ces verres vers l'extérieur, du « léchage » éventuel par des eaux de ruissellement. Quant aux formations géologiquement stables et à l'abri de l'eau, on prospecte actuellement des mines de sel désaffectées. Mais rappelons qu'aux États-Unis, le seul site retenu, au Kansas, s'est lui-même avéré perméable à la pénétration d'eau. Aussi les responsables de ces problèmes, tant en France qu'ailleurs, reconnaissent-ils qu'il n'existe pas actuellement de solution sûre sur de telles échelles de temps. Tout au plus espère-t-on que, d'ici 50 à 100 ans, on aura trouvé une solution définitive à ce problème des déchets (par exemple, [transmutation](#) des transuraniens dans des réacteurs à neutrons rapides, éjection spatiale, etc.). Mais peut-on réellement engager [les générations futures](#) en espérant que celles-ci trouveront « la solution » ? Il est en fait probable que d'ici 50 à 100 ans les pouvoirs publics engagent leurs efforts de recherche dans des domaines tout à fait nouveaux, après l'abandon de l'énergie nucléaire, et que les pouvoirs publics remettent toujours à plus tard la recherche d'une solution définitive.

7. Sécurité des réacteurs PWR et surgénérateurs. Transport de matières radioactives

Les autres chapitres de cette brochure montrent que l'industrie nucléaire, même en fonctionnement normal, engendre de nombreux risques et dangers. De tels risques sont délibérément pris par les promoteurs de l'électronucléaire, qui mettent en balance l'apport énergétique et le danger quotidien. Ces risques sont minimisés mais reconnus. Par contre, les mêmes promoteurs assurent que le luxe des précautions prises rend le risque d'accident quasiment nul. Or, nous allons le voir, cette approximation est fautive.

Pour ce chapitre, nous nous intéresserons exclusivement [aux accidents](#) pouvant intervenir au niveau des

centrales, parce qu'ils auraient de très graves conséquences ; mais cela est vrai tout au long de la chaîne du combustible. Ainsi, au niveau de l'usine de retraitement de La Hague, des accidents catastrophiques peuvent, hélas, être envisagés.

1. Accident dans un réacteur PWR

1. Description de l'accident

Dans les réacteurs PWR, l'eau sert à la fois de fluide caloporteur et de modérateur, c'est-à-dire de ralentisseur de neutrons permettant à ceux-ci d'être plus efficaces pour la fission nucléaire. Une perte d'eau entraîne donc une diminution de l'effet modérateur, dont l'heureuse conséquence est l'arrêt de la réaction en chaîne. De ce point de vue, une fuite n'apparaît donc pas comme catastrophique. Cependant, les produits de fission sont radioactifs et, après l'arrêt de la réaction en chaîne, ils fournissent une énergie encore importante, dissipée sous forme de chaleur - soit environ, immédiatement après l'arrêt, 7 % de la puissance nominale, ce qui est encore considérable. Une telle puissance peut transformer en vapeur près d'une tonne d'eau par seconde.

Le problème de la perte de réfrigérant est donc, malgré son effet autorégulateur, très aigu pour les PWR, car ces réacteurs sont très compacts : la puissance par unité de volume*¹ y est 100 fois plus forte que dans les centrales graphite-gaz (100 kW/litre contre 1 kW/litre). Le type d'accident qui en résulte (LOCA : *Loss of Cooling Accident*, accident par perte de réfrigérant) est ainsi décrit dans un rapport de l'AEC (*Atomic Energy Commission*) : « Si l'évacuation de la chaleur n'était pas faite, la température des gaines augmenterait jusqu'à la fusion et on aurait une ou plusieurs conséquences : [...] la dispersion de produits de fission du circuit cœur dans l'enceinte de confinement et peut-être aux alentours de l'usine. »

En général, pourtant, les constructeurs estiment que l'ampleur de l'accident maximal au cours d'un LOCA ne dépasserait pas la fusion du cœur (ce qui serait déjà une catastrophe économique) pour deux raisons essentielles :

- on exclut la possibilité de rupture de la cuve,
- on compte sur le bon fonctionnement du [système de refroidissement de secours](#) (ECCS, *Emergency Cooling Core System*).

Nous verrons dans les paragraphes suivants que ces deux raisons peuvent donner quelques inquiétudes.

* Les appels de note chiffrés renvoient aux références p. 30.

2. Rupture d'une canalisation

L'origine considérée comme la plus probable pour un LOCA est la rupture d'une canalisation de grosse section, ce qui, de l'avis des constructeurs, ne serait pas d'une gravité extrême quant aux conséquences pour l'environnement. Ils s'appuient sur les conclusions du rapport Rasmussen (octobre 1975), qui évalue à $5 \cdot 10^{-5}$ la probabilité par réacteur et par an pour qu'un tel accident se produise. Pour 1 000 réacteurs en service, on pourrait avoir 5 accidents par siècle.

Les calculs supposent le bon fonctionnement de l'ECCS, ce qui, nous le verrons plus loin, est optimiste. De plus, la méthode employée dans le rapport Rasmussen, dite « méthode des arbres de défaillance », a été violemment critiquée aux États-Unis, notamment dans le rapport Kendall². Elle a été développée par la NASA pour les vols spatiaux et ne s'est guère montrée satisfaisante : la fiabilité prédite au début des années soixante, avec la « méthode des arbres de défaillance », pour le moteur du 4^e étage d'Apollo était de 0,9999, soit une défaillance pour 10 000 missions. Cependant, dans la réalité, après des milliers d'essais, on a enregistré en moyenne 4 défaillances pour 100 missions, soit 400 fois plus de défaillances que prévu. La méthode employée est donc très optimiste en ce qui concerne l'évaluation absolue des probabilités d'accidents.

3. Fonctionnement de l'ECCS

L'ECCS a pour fonction de déclencher un refroidissement de secours pour empêcher le combustible du réacteur de fondre ou de changer de structure en cas de défaillance du circuit de refroidissement primaire. Il peut consister, par exemple, à injecter de l'eau entre la cuve et l'écran thermique.

Compte tenu de l'extrême complexité des phénomènes mis en jeu, une étude par le calcul était illusoire ; une étude expérimentale a été entreprise aux États-Unis. Or, le système de secours n'a pas fonctionné lors de ces essais. De nouvelles expériences sont en cours aux USA sur un réacteur expérimental de 17 MWé, soit 60 fois moins puissant que les réacteurs actuellement en construction.

4. Rupture de la cuve

Si les constructeurs français n'envisagent pas le cas de rupture de cuve, il n'en est pas de même à l'étranger. En particulier, l'Angleterre a renoncé à la filière PWR à la suite de la déposition du métallurgiste de renommée mondiale, Alan Cottrel, devant le Comité de la science et de la technologie de Grande-Bretagne.

Les incertitudes ont paru trop grandes au Parlement anglais pour accepter les risques. Sans entrer dans le détail des arguments présentés ³, on doit signaler que la cuve doit résister à une énorme pression (150 kg/cm²). La fabrication de cette cuve nécessite donc l'utilisation de technologies de fabrication des plus sophistiquées. Dans ce cas, on sait très mal évaluer un coefficient de sécurité, d'autant plus qu'on ne connaît pas bien l'effet du vieillissement sous flux neutronique des aciers employés. Enfin, l'effet de « fuite avant rupture », qui a été utile dans le passé pour prévenir des ruptures catastrophiques, n'existe pas ici.

La rupture pourrait donc être brutale et la sécurité des cuves dépend uniquement des contrôles de qualité de fabrication et des contrôles répétés **des fissures** par des ultra-sons. Une rupture de cuve de PWR peut être assimilée à une explosion non pas nucléaire, mais thermodynamique.

5. Les effets d'un LOCA

L'importance des effets d'un accident est évaluée de façon tout à fait différente par les partisans et les adversaires des PWR. D'après **le rapport Rasmussen**, la conséquence la plus probable serait 100 000 dollars de dégâts matériels, sans morts ni blessés. D'après le rapport Kendall, on aurait 30 000 morts immédiats et 90 000 maladies graves...

Ces divergences sont dues à des estimations différentes concernant :

- la puissance maximale prise en compte,
- l'efficacité des systèmes de secours,
- la situation de la centrale par rapport aux agglomérations les plus proches,
- l'état des vents dominants,
- la rapidité d'évacuation après l'alerte.

Une telle incertitude quant à la gravité des accidents possibles est à nos yeux bien inquiétante.

Le rapport Rasmussen fait une analyse très détaillée des effets d'un LOCA, mais souvent les promoteurs du nucléaire ne retiennent que les effets immédiats d'un tel accident, en s'appuyant sur une courbe présentée dans l'introduction du rapport et qui montre que le risque d'accident dû à 100 réacteurs nucléaires est analogue au risque d'accident dû aux chutes de météorites. Indépendamment du fait que ce chiffre est très contestable, comme on l'a vu précédemment, il ne faut pas oublier non plus que le rapport Rasmussen s'intéresse également aux décès « différés » qui surviennent dans les 40 ans suivant l'accident. Ainsi, à partir des appendices VI et VII du rapport Rasmussen, on peut conclure que les conséquences suivantes, à long terme, ont la même probabilité que 10 morts « immédiats » dus à un LOCA :

- 7 000 morts par cancer,
- 4 000 anomalies génétiques,
- 60 000 tumeurs de la thyroïde,
- 8 000 km² de terrains contaminés au-dessus des normes maximales admissibles.

2. Accidents dans les surgénérateurs

Alors que les risques consécutifs à l'adoption de la filière américaine PWR sont déjà supérieurs à ceux de la technique française graphite-gaz, le passage aux surgénérateurs accroît encore considérablement ces dangers, pour deux raisons principales.

La première peut être résumée de la façon suivante : avec les surgénérateurs, on va passer du « tout électrique, tout nucléaire » au « tout nucléaire, tout plutonium ». Cette filière repose en effet sur la production et l'utilisation massive du plutonium 239, matériau « fissile », à partir de l'uranium 238, matériau « fertile ». Or, le plutonium est un corps extrêmement dangereux :

- d'une part, sa toxicité radioactive est telle que, s'il est inhalé en aérosol, il entraîne un cancer mortel du poumon à partir d'une dose estimée entre un microgramme et un milligramme. La dispersion accidentelle de plutonium, soit lors du transport ou du retraitement, soit lors d'avaries de centrales, aurait donc des

conséquences redoutables ;

- d'autre part, il suffit de 5 à 10 kg de plutonium pour faire une bombe atomique. Avec un « parc » de surgénérateurs tel que nous le promet la direction d'EDF (1 surgénérateur de 1 800 MWé par an à partir de 1985), des dizaines de tonnes de plutonium circuleront en France chaque année.

La deuxième raison est qu'à la différence des centrales nucléaires « conventionnelles », et à l'inverse de tout ce qui a été déclaré par la propagande officielle, les surgénérateurs peuvent, par accident, faire explosion à la façon d'une bombe atomique.

La variété d'explosion atomique dont un surgénérateur peut être le siège porte le nom - plus rassurant - d' « [excursion nucléaire](#) ». Plusieurs excursions nucléaires successives peuvent se produire. Le problème est de savoir si ces explosions pourront être contenues par les enceintes prévues autour du réacteur. Les experts ont donc cherché à évaluer la puissance de ces explosions. Pour le réacteur Super-Phénix, qui doit être installé à Malville, à 44 km de Lyon, les estimations quant à l'équivalent en explosifs classiques de l'excursion nucléaire vont de quelques tonnes à quelques dizaines de tonnes d'explosifs si l'on considère l'énergie totale libérée, de quelques centaines de kilogrammes à quelques tonnes pour l'énergie mécanique. Ces valeurs, selon les optimistes, sont à la limite de ce que peuvent contenir les enceintes prévues. De plus, ces résultats ont été obtenus à l'aide de modèles de calcul comportant de nombreuses hypothèses simplificatrices, et reposent sur une base expérimentale extrêmement mince. En effet, Super-Phénix comportera environ 35 tonnes de combustible nucléaire, dont 5 tonnes de plutonium, et les expériences d'excursion nucléaire n'ont jamais concerné que quelques kilogrammes de matière fissile.

Il est clair qu'étant donné l'extraordinaire toxicité radioactive des aérosols de plutonium, l'expulsion même partielle des 5 tonnes de plutonium de Super-Phénix, dispersées ou volatilisées par l'excursion nucléaire, constituerait une catastrophe sans précédent.

Sur les 7 surgénérateurs producteurs d'électricité qui ont déjà fonctionné, 3 (EBR 1, Enrico Fermi, BN 350) ont eu de graves accidents, proportion jamais vue dans aucune autre filière. Les documents officiels français indiquent que la valeur numérique de la probabilité d'excursion nucléaire n'a pas été calculée. De nombreuses causes peuvent être à l'origine d'excursions nucléaires. On envisage par exemple une déformation brutale du cœur par propagation rapide d'une rupture d'assemblage, déformation qui entraverait la circulation du sodium réfrigérant et empêcherait les barres de contrôle de fonctionner. On peut craindre également la formation d'une masse surcritique locale à la suite d'une fusion partielle, ce qui provoquerait une compaction du reste du cœur et une excursion nucléaire d'ensemble. On peut envisager enfin des pannes simultanées d'organes essentiels, l'éjection de barres de contrôle, des fautes au déchargement, [un sabotage](#).

Outre les risques d'explosion nucléaire dus à la présence de plutonium, d'autres risques très inquiétants sont à signaler du fait des tonnages considérables de sodium liquide (environ 5 000 tonnes dans le cas de Super-Phénix) nécessaires à l'évacuation de la chaleur dégagée par le cœur du réacteur. Le sodium est un métal extrêmement réactif qui s'enflamme spontanément au contact de l'air et explose au contact de l'eau. Dans l'état actuel des techniques, il est impossible de maîtriser un incendie de plus d'une tonne de sodium. De graves accidents se sont déjà produits le surgénérateur de Shevtchenko a été très gravement endommagé en 1974, à la suite d'un incendie de sodium.

Les pays étrangers font preuve d'une grande prudence. Les États-Unis, à la suite des accidents d'EBR 1 et Enrico Fermi, renoncent à lancer la filière des surgénérateurs. La Grande-Bretagne construit ses surgénérateurs dans la seule région quasi désertique qu'elle possède, l'extrême nord de l'Écosse. L'URSS n'ose pas passer directement de 350 MWé à plus de 1 000 MWé, et construit un réacteur de 600 MWé. En France, les dirigeants ont décidé de sauter allègrement de 250 MWé (Phénix) à 1 200 MWé (Super-Phénix), et d'[implanter entre Lyon, Grenoble et Genève](#) le premier surgénérateur géant. Ces responsables formulent des assertions rassurantes telles que : « On notera tout d'abord qu'il est physiquement impossible à un réacteur nucléaire d'exploser comme une bombe atomique » (rapport d'Ornano, novembre 1974), ou : « Un réacteur nucléaire n'a, en effet, rien à voir avec une bombe atomique. Il ne saurait exploser » (*l'Énergie nucléaire*, délégation générale à l'Information, avril 1975). Ils glissent dans leurs publicités des phrases ambiguës : « La centrale atomique utilise un combustible impropre à une fission explosive. » Tout cela est pourtant contredit par ces phrases en style télégraphique qui concernent les surgénérateurs : « Potentiel accidentel d'excursion nucléaire prompte, critique sous l'effet de compaction, libérant de l'énergie mécanique sous forme explosive » (commissariat à l'Énergie atomique, *Bulletin d'informations scientifiques et techniques*, n° 208, novembre 1975, p. 33), et « Potentiel d'explosions dues à l'interaction violente Na-UO₂ fondu. Processus peut se coupler avec explosion nucléaire » (*ibid*, p. 34).

3. Transport de matières radioactives

Les transports sont assurés par voie ferrée et par route.

Un réacteur PWR de 1 000 MWé utilise 30 tonnes de combustible par an. Les produits transportés consistent actuellement en uranium enrichi à 3 %, Les problèmes apparaissent surtout au déchargement ; l'ensemble contient alors 29 tonnes d'uranium, 1 tonne de produits de fission, 300 kg de plutonium, 9 tonnes de gai-

nes irradiées. Ce combustible irradié est extrêmement radioactif à sa sortie du réacteur, et l'on doit attendre 5 mois avant de pouvoir le transporter. Il est ensuite envoyé à La Hague, qui reçoit également **des charge-ments venant de l'étranger**.

Les règlements paraissent complets, élaborés et rigoureux. Chaque emballage (conteneur pour le mine-rai, château de plomb pour le combustible irradié) doit avoir été préalablement testé, et la sécurité repose essentiellement sur cet emballage qui doit strictement répondre aux conditions imposées par le règlement. L'utilisateur, qui peut être une compagnie de transport privée, endosse donc une responsabilité énorme, car c'est lui qui garantit que l'emballage est conforme à sa description, que son chargement est correct et sur-tout qu'il est en bon état, toutes choses impossibles à vérifier lors du transport.

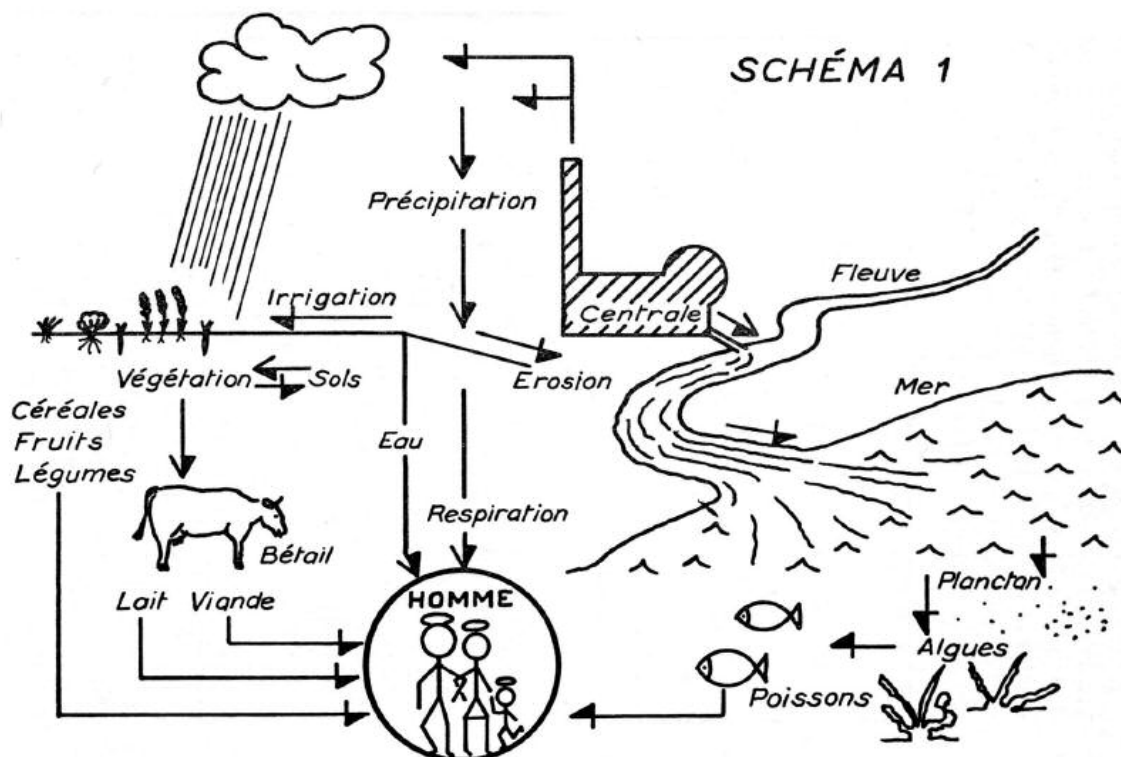
Peu d'accidents graves sont encore à déplorer, mais on peut citer des cas récents :

- 30 mai 1973 : fiche descriptive non correcte, un conteneur signalé vide contenait une source de 700 Ci de cobalt, 2 travailleurs de Saclay se font irradier,
- décembre 1974 : de l'uranate de magnésium est répandu sur 4 km de voie ferrée près de Narbonne,
- janvier 1975 : utilisation d'un conteneur défectueux 80 kg d'UF₆ s'échappent à Pierrelatte,
- 12 janvier 1975 : 2 fûts d'uranate de soude sont déversés sur la route près de Béziers,
- mars 1975 : des fûts contaminent un navire,

Que va-t-il se passer quand les cadences vont augmenter ? La réglementation sera-t-elle respectée ? De plus, on peut se demander si les épreuves auxquelles sont soumis les châteaux de plomb qui transportent le combustible irradié sont suffisantes. Ces châteaux doivent résister à une chute de 9 m sur terrain plat et 1 m sur terrain accidenté, ainsi qu'à 800 °C pendant 30 mn. Est-il impensable qu'un accident ferroviaire ou routier plus grave se produise ? Les premiers accidents signalés augurent mal de la résistance de certains emballages, alors qu'ils sont actuellement à l'état neuf et que les transports sont peu nombreux. Qu'en sera-t-il lorsque le matériel aura vieilli et que des centaines de camions sillonneront les routes ?

8. Concentration des radionucléides dans la chaîne alimentaire et quel-ques effets écologiques

Il est aberrant de vouloir estimer la pollution de l'environnement en supposant une répartition uniforme des éléments rejetés dans l'atmosphère, les eaux fluviales ou les océans. En effet, l'expérience montre que beaucoup d'espèces végétales ou animales, principalement les espèces aquatiques, concentrent dans leurs tissus de nombreuses substances produites artificiellement par l'homme, et en particulier des radionucléides rejetés par l'industrie nucléaire. Ces éléments cheminent ensuite dans la biosphère et peuvent nous contaminer par les chaînes alimentaires (schéma 1).



1. La pollution radioactive du milieu marin

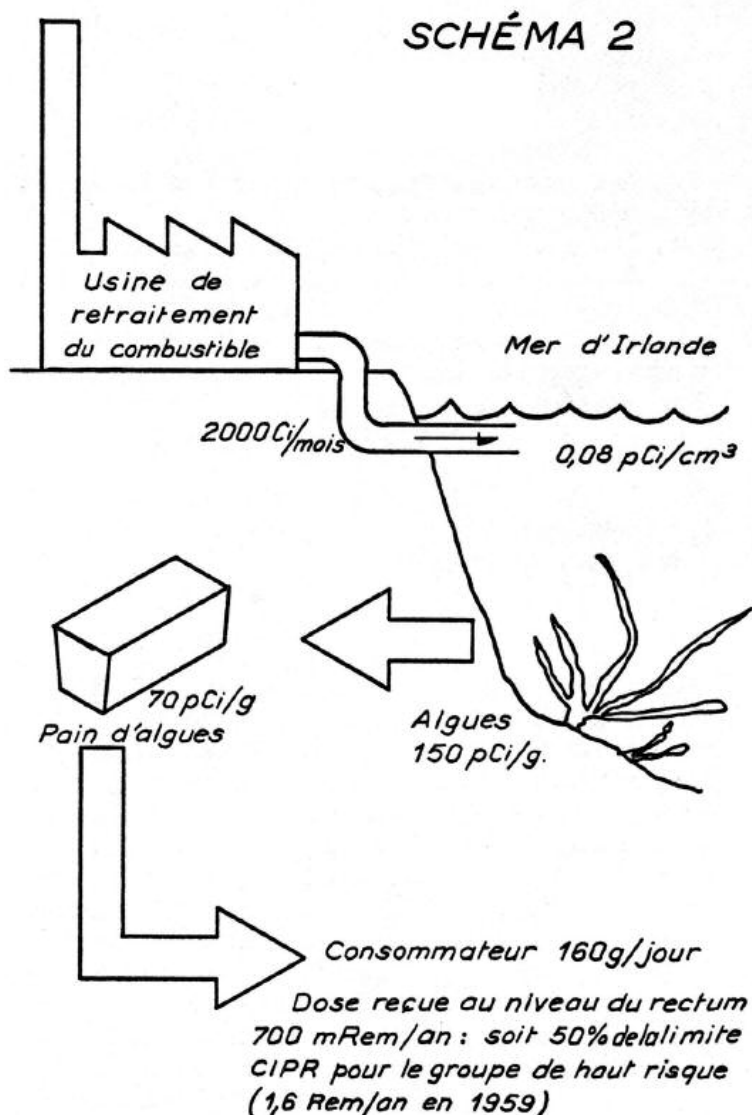
Coquillages, crustacés et poissons peuvent nous apporter, à des taux non négligeables, des radionucléides censés se diluer dans l'immensité des eaux océaniques. En effet, d'une part les êtres vivants, par leurs déplacements, facilitent la dispersion des substances actives, accroissant ainsi l'étendue des zones contaminées ; d'autre part ils les concentrent dans leur organisme.

Le plancton végétal de la surface des mers représente le premier palier de concentration. Le tableau ci-dessous donne le facteur de concentration pour quelques radionucléides rejetés ; pour le cérium 144, il est de 90 000, c'est-à-dire qu'un volume donné de plancton contient 90 000 fois plus de cérium 144 que le même volume d'eau de mer.

Radioélément	Période	Facteur de concentration dans le plancton végétal marin
Cobalt 60	5 ans	1 000
Carbone 14	5 800 ans	4 000
Zinc 65	245 jours	20 000
Phosphore 32	14 jours	30 000
Fer 55	3 ans	40 000
Plomb 210	21 ans	40 000
Cérium 144	285 jours	90 000

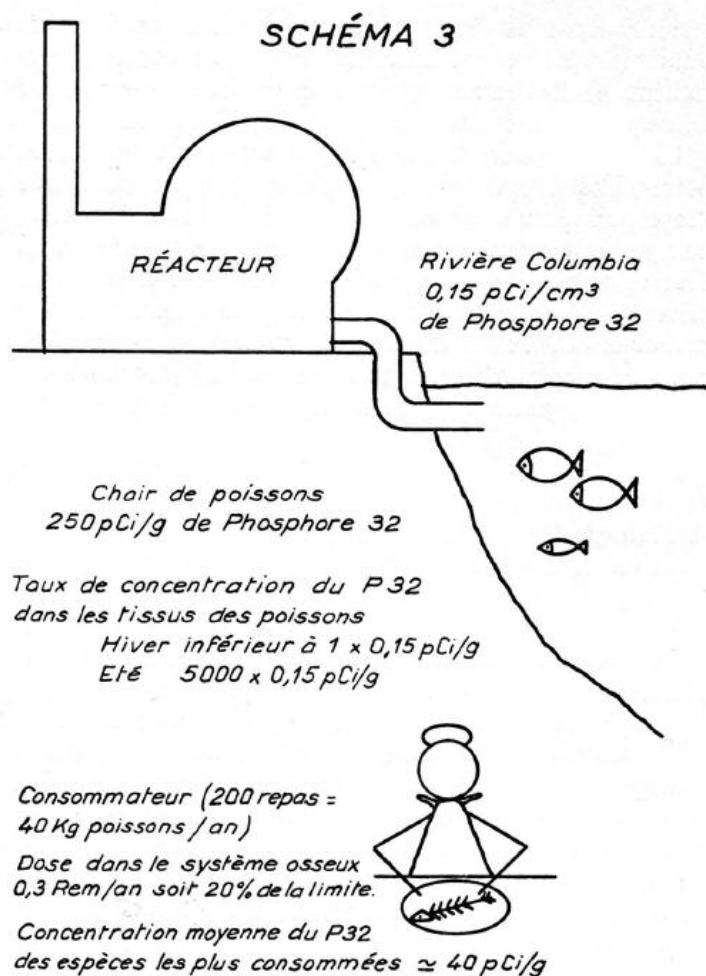
Le plancton végétal ayant accumulé ces radionucléides est la proie du plancton animal qui contamine à son tour d'autres organismes, et donc l'homme, consommateur final de nombreuses chaînes alimentaires du milieu marin.

Les algues marines concentrent de façon analogue ; par exemple, en 1959, 25 000 Gallois furent exposés (au niveau intestinal) à des doses supérieures au maximum admis par la [Commission internationale de protection radiologique \(CIPR\)](#) pour le groupe de haut risque (c'est-à-dire le personnel travaillant en zone dangereuse dans une centrale nucléaire). Ils avaient consommé un produit à base d'algues du genre *porphyra*, qui concentrent 1 800 fois le ruthénium 106, rejeté par l'usine de traitement de Windscale. Les précautions prises après cette constatation ont fait diminuer le taux de contamination, qui correspond néanmoins encore à 700 millirems par an (schéma 2).



2. La pollution radioactive des eaux fluviales

Avant d'aboutir à celle du milieu marin, cette pollution inquiète les pêcheurs en rivière. A la suite de rejets d'effluents dans le fleuve Columbia, dans l'Ouest des États-Unis, le phosphore 32 a été concentré 5 000 fois dans la chair des poissons (schéma 3), et leurs consommateurs ont été exposés à une dose annuelle de 300 millirems. Les effets se manifestent surtout au niveau de la moelle osseuse, où se forment les cellules sanguines.



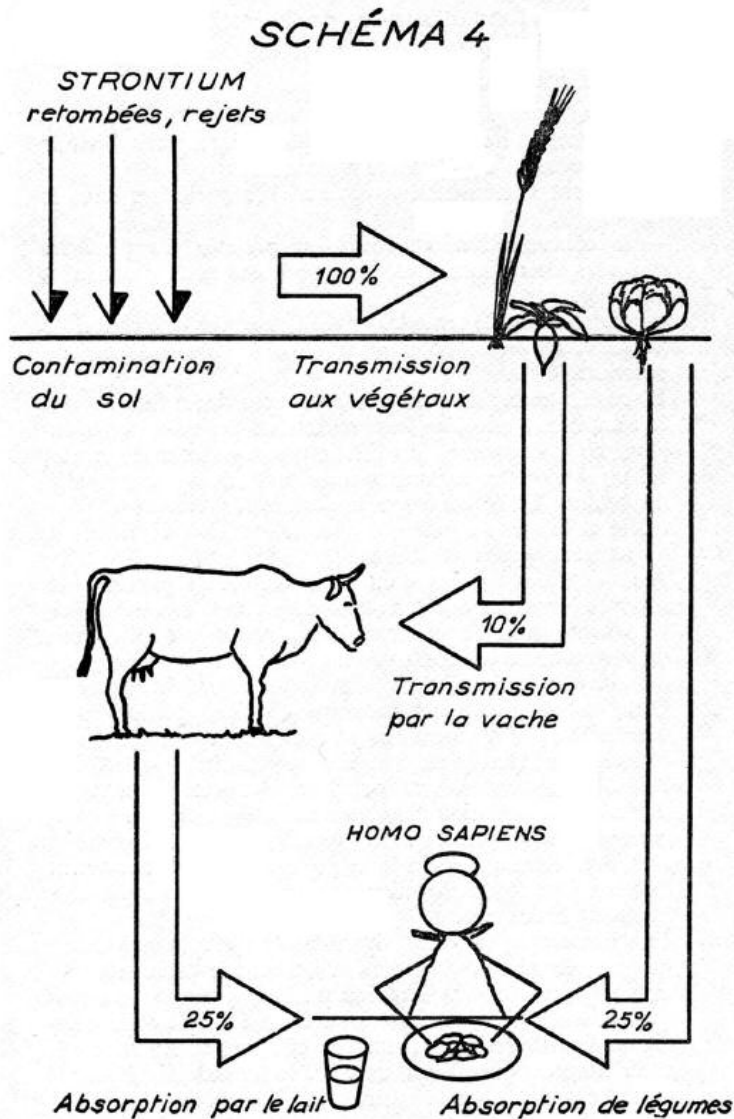
3. La pollution radioactive des sols, des plantes et des animaux terrestres

Les poussières, vapeurs et gaz radioactifs émis dans l'atmosphère et les effluents liquides rejetés dans les rivières aboutissent à la pollution de notre milieu de vie. Les sols sont souillés par les retombées et les eaux d'irrigation. Malgré la capacité de rétention de nombreux radionucléides par les minéraux, les eaux de ruissellement qui alimentent les nappes phréatiques lessivent sol et sous-sol et peuvent contaminer les eaux de boisson. Les végétaux fixent les radionucléides du sol et des eaux d'irrigation et les transmettent à l'homme, soit directement (légumes, fruits, céréales...), soit par l'intermédiaire du bétail. Si bien que nous subissons à la fois l'irradiation externe par l'air ambiant et le sol mouillé, et la contamination interne par l'air inhalé, l'eau et les aliments ingérés.

Prenons un exemple : si du strontium 90 était accidentellement émis dans une localité, il contaminerait les eaux de ruissellement et les sols avoisinants. Ce radionucléide ayant des propriétés chimiques voisines de celles du calcium, il serait fixé par les végétaux, contaminerait les bovins, puis l'homme par l'intermédiaire du lait et des produits laitiers (schéma 4). Les enfants seraient les premières victimes car leur squelette en croissance a de gros besoins en calcium.

La CIPR, pour définir les concentrations maximales admissibles (CMA) dans les eaux rejetées, ne considère que l'ingestion d'eau comme voie de contamination. Pour tenir compte de la contamination par la chaîne alimentaire, il faut donc réduire ces CMA. Des calculs concernant le césium 137 et le strontium 90 montrent qu'il faudrait diviser ces CMA par 20 pour les populations proches du point de rejet, par 7 (césium

137) et par 1,25 (strontium 90) pour la moyenne des populations plus éloignées.



4. Exemple de pollution radioactive du milieu terrestre

Le bassin rhodanien présente la particularité de rassembler sur ses 120 000 km² tous les types d'activités nucléaires, le long d'un fleuve où la pollution chimique est déjà très forte. Par ailleurs, on demande à ce fleuve d'irriguer de nombreuses cultures (30 % de la production fruitière française, 10 % de la production légumière, 100 % du riz), dont certaines poussent à même ses sédiments. Il débouche le long d'une côte très touristique et sur un site protégé, la Camargue, qui constitue une réserve riche par sa faune et sa flore.

Une étude faite par le CEA⁵ a porté sur deux points :

- identifier les voies de transfert des radionucléides rejetés dans le bassin,
- déterminer les points critiques pour orienter le choix des implantations futures.

Cette étude se fondait sur des prélèvements effectués en de nombreux points du bassin pendant 7 ans. Voici des extraits de sa conclusion :

Deux facteurs nouveaux vont modifier l'acceptation par le milieu des rejets des éléments radioactifs :

- d'abord l'augmentation des activités nucléaires dans le bassin,
- la concentration, en cours ou projetée, de plusieurs centrales électronucléaires, de type à eau sous pression et sur-générateurs,
- mais surtout le remodelage du fleuve par la création de plusieurs barrages, notamment dans le tiers aval de son parcours.

De ce fait, les installations nucléaires actuelles et futures vont être amenées à effectuer leurs rejets dans des eaux tranquillisées, les phénomènes de dilution seront atténués et les échanges avec les sédiments constitutifs du lit seront

plus importants. En conséquence, la portion la plus en aval, l'estuaire et la mer ne joueront plus qu'un faible rôle dans la dispersion des éléments radioactifs. [...] A la suite des travaux dont nous venons de parler, nous sommes persuadés que dans le domaine de la sauvegarde de l'environnement, il convient de ne pas se borner à un examen de la situation à un instant donné mais de suivre l'évolution du milieu avec le temps.

Cette recommandation trouve une justification supplémentaire à la suite d'observations faites récemment par notre équipe dans le bassin rhodanien et sur d'autres cours d'eau l'effet de synergie entre pollution radioactive, pollution thermique et pollution chimique. Les études expérimentales entreprises il y a près de 10 ans concernaient un bassin où la pollution chimique, bien que présente, était relativement faible et la pollution thermique inexistante, mais, depuis lors, la qualité des eaux s'est dégradée. Concurrément à cette situation nouvelle, nous avons observé au niveau du cours d'eau une modification du comportement des ions radioactifs, par exemple une plus grande mobilité ayant pour origine la formation de complexes à partir des rejets industriels effectués en amont. Cette mobilité provoque un transfert des radionucléides à longue distance dans le cours du fleuve, dans les canaux d'irrigation et dans les nappes. Certains éléments tels que le cobalt se déplacent dans le sol avec le front de l'eau. Le risque de pollution des nappes est à prévoir.

Grâce à une politique de rejet conforme aux prescriptions, [...] les concentrations observées n'ont jamais atteint des seuils critiques.

Mais à travers cette conclusion optimiste pour le passé, nous donnons en fait un avertissement pour l'avenir. Le bassin est en voie de transformation, les implantations nucléaires vont augmenter, les pollutions chimique et thermique suivront vraisemblablement cet accroissement, c'est pourquoi l'observation du bassin doit continuer et l'implantation de nouveaux sites nucléaires doit tenir compte de son évolution. L'intégration des implantations actuelles dans l'environnement a été réussie, il serait regrettable pour l'avenir de ne pas tenir compte de l'expérience acquise, et en particulier de concevoir une implantation nouvelle de sites nucléaires sans l'intégrer radioécologiquement dans le bassin. Les conclusions générales tirées de l'étude du bassin rhodanien nous paraissent extrapolables aux autres bassins fluviaux.

Cette étude officielle a été publiée au début de 1973, c'est-à-dire *avant* la décision gouvernementale de lancer un programme intensif de construction de centrales nucléaires. Suivant ce programme, la puissance nucléaire installée dans la vallée du Rhône doit être multipliée par 25 d'ici 1985 ; cela augmentera d'autant le volume des rejets radioactifs, et contribuera pour une très large part à l'augmentation de la pollution thermique du fleuve. Ces effets, joints aux travaux d'aménagements fluviaux et à la pollution chimique, laissent présager une situation plus inquiétante dans un proche avenir, même en l'absence de tout incident de fonctionnement des installations nucléaires.

9. Problèmes biologiques

1. Les différentes sources d'irradiation

Comme toute industrie moderne, l'industrie nucléaire est la source d'une pollution. Celle-ci se traduit en particulier par l'introduction dans l'environnement de corps radioactifs au cours des différentes étapes du cycle du combustible. Le retraitement du combustible irradié en est l'étape la plus polluante, surtout à l'égard du milieu aquatique.

1. Les différents types de rayonnement

Les radionucléides se transforment spontanément (désintégration) en émettant des rayonnements qui peuvent être de plusieurs sortes, mais présentent cependant tous un certain nombre de propriétés communes. Ces rayonnements sont invisibles, et peuvent pénétrer dans la matière à des profondeurs variables selon leur nature.

a. Les rayons gamma (γ), comme les rayons X, sont constitués par des ondes électromagnétiques. Les rayons γ sont très pénétrants et capables, dans certains cas, de cheminer à travers des blindages épais de plusieurs mètres. Ils sont utilisés en radiothérapie ; par exemple, les rayons émis par une « bombe au cobalt » sont capables de détruire des tumeurs profondes.

b. Les rayonnements corpusculaires sont constitués par des particules :

- les rayons bêta (β) sont des électrons de vitesse proche de celle de la lumière, ils peuvent traverser plusieurs centimètres de tissus,

- les rayons alpha (α) sont des noyaux d'hélium ; beaucoup plus lourds, ils sont arrêtés par les couches superficielles de la peau.

2. Notions d'irradiation et de contamination

Les rayonnements peuvent atteindre l'organisme humain de trois façons :

- par l'irradiation externe, c'est-à-dire l'exposition du corps à des rayonnements émis par des sources qui lui sont extérieures,
- par la contamination cutanée qui est la souillure de la peau par le contact avec des substances radioactives,
- par la contamination interne provenant de l'incorporation de substances radioactives aux tissus vivants. Cette contamination peut se faire par voie respiratoire, digestive ou transcutanée (diffusion par la peau).

3. Irradiation naturelle et irradiation artificielle

Tout être vivant est soumis dans les conditions naturelles à une exposition permanente à diverses sources naturelles d'irradiation externe (rayons cosmiques, écorce terrestre) (80 %) ou interne (potassium 40, carbone 14, ...) (20 %). Cette **radioactivité naturelle**, très variable d'une région à l'autre, n'est sans doute pas inoffensive. Au contraire, elle est probablement responsable d'une bonne partie des mutations, malformations et cancers qui apparaissent spontanément dans les contrées non encore industrialisées. Une étude récente⁶ met en évidence le rôle que peut jouer une radioactivité naturelle élevée (1 500 à 3 000 mrems/an) dans la prépondérance relative du mongolisme et de retards mentaux (associés ou non à des anomalies physiques) dans une certaine région de l'Inde, par rapport à une région témoin où la radioactivité naturelle est beaucoup plus faible (100 mrems/an).

Par ailleurs, l'**irradiation médicale** et, dans une moindre mesure, la télévision jouent un rôle prépondérant comme sources d'irradiation artificielle, mais elles sont également essentiellement externes. La tendance actuelle est d'ailleurs à la réduction des examens radiologiques systématiques et à l'augmentation des protections tant pour le personnel médical que pour les patients.

L'industrie électronucléaire ne contribue actuellement* **presque pas** à notre irradiation externe. Il est, par contre, à craindre qu'une partie même infime de la radioactivité énorme contenue dans les déchets radioactifs ne se retrouve dans l'environnement et, par le biais des chaînes alimentaires, ne remonte jusqu'à l'homme et contribue de façon importante à augmenter notre irradiation interne.

* En 1977, donc avant Three Mile Island, Tchernobyl...

2. Effets biologiques des radiations ionisantes

1. Au niveau moléculaire

L'effet initial de toute irradiation est de provoquer des modifications des atomes et des molécules constituant la matière vivante. Les diverses radiations sont ionisantes, c'est-à-dire qu'elles peuvent arracher des électrons aux couches périphériques des atomes. Un atome ionisé peut donner naissance à une transformation chimique de la molécule dont il fait partie, il peut également créer dans les tissus des radicaux libres très actifs qui propagent l'action du rayonnement à d'autres molécules. Dans les deux cas, ces actions peuvent conduire à des modifications de la vie cellulaire.

Les rayons γ ont un effet ionisant relativement faible. Les rayons β et α sont beaucoup plus ionisants. La nocivité variable des différentes sortes de rayonnement dépend de leur pouvoir ionisant, qui est pris en compte pour leur attribuer des coefficients « d'efficacité biologique » (tableau ci-dessous). Ces coefficients servent à la définition des « doses d'irradiation » que peuvent recevoir les tissus vivants (voir définition du rem p. 7).

L'importance écologique des divers radionucléides n'est pas comparable. En particulier, les effets des radioisotopes des corps simples, constituants fondamentaux de la matière, sont redoutables car, concentrés par les chaînes alimentaires, ils deviennent les constituants de la matière organique.

a. Le tritium (^3H), émetteur β : isotope de l'hydrogène, il peut le remplacer dans l'eau et dans toutes les molécules organiques. A son propos, de nombreuses questions sont en suspens, et ceci est d'autant plus grave que des quantités importantes d'eau tritiée sont rejetées par les centrales. Or l'on ne sait pratiquement rien sur la manière dont le tritium est transféré de l'eau aux molécules organiques (photosynthèse chez les végétaux), ni dont il

Type du rayonnement	Nombre d'ionisations produites en 1 μ (= 0,001 mm) dans la matière vivante	Coefficient d'efficacité biologique
β, γ	6 à 8	1
X (200 KeV)	80	1
α (5 MeV)	3 700	15-20

peut être concentré le long des chaînes alimentaires. Les effets génétiques du tritium sont en cours d'étude.

b. L'iode 131 (^{131}I), émetteur (β et γ) : l'iode est concentré sélectivement dans la thyroïde. La période de l'iode 131 est de 8 jours. Or le renouvellement de l'iode dans l'organisme n'est pas très rapide, ce qui fait que l'iode 131 peut libérer la quasi-totalité de sa radioactivité avant d'être évacué de l'organisme. La thyroïde joue un rôle essentiel dans un système complexe de régulations de tout l'organisme, mais surtout son bon fonctionnement permet un développement normal et une croissance harmonieuse, ce qui rend les enfants particulièrement vulnérables.

De même, l'analogie des propriétés chimiques du strontium 90 avec celles du calcium (fixation dans les os) et du césium 137 avec celles du potassium (fixation dans les muscles) rend ces deux isotopes très dangereux.

Des radionucléides non incorporés dans des molécules organiques peuvent également être des sources d'irradiation importante car s'ils sont absorbés, par inhalation ou à l'occasion d'une blessure, ils peuvent être maintenus dans des « impasses » (alvéoles pulmonaires, capillaires sanguins) et irradier les cellules alentour de manière continue et permanente :

- le *plutonium 239*, émetteur α , se fixe ainsi préférentiellement dans les poumons (inhalation), et dans les os et le foie en cas de passage dans le sang. Il est éliminé trop lentement pour l'être complètement du vivant de l'individu contaminé : après 40 ans, il reste la moitié du plutonium fixé dans le foie, et après 100 ans dans les os. Les risques de cancer du poumon et des os ne sont pas négligeables, c'est pourquoi l'on parle d'abaisser les limites autorisées d'exposition.

2. Au niveau cellulaire

Des molécules fondamentales pour la cellule et l'organisme, les molécules d'acides nucléiques, constituent le matériel génétique : elles permettent la transmission des caractères héréditaires, elles contiennent l'ensemble des informations nécessaires au fonctionnement de la cellule. Cette information est contenue, sous forme codée, dans la structure de ces molécules géantes. Leur très grande taille les rend particulièrement sensibles aux radiations, soit par ionisation directe, soit sous l'action des produits de radiolyse (dissociation) de l'eau. Les altérations de la structure du matériel génétique peuvent :

- soit perturber le fonctionnement ou la structure de la cellule et éventuellement provoquer sa mort. Des effets analogues peuvent être la conséquence de l'altération d'autres types de molécules,
- soit modifier le sens du message génétique, provoquant une mutation, éventuellement létale : c'est l'effet mutagène.

3. Au niveau physiologique

Selon le type de cellules touchées, on distingue deux sortes d'effets des rayonnements : somatiques et génétiques.

a. Les effets somatiques (de *soma* = corps) touchent les cellules assurant le fonctionnement de l'organisme. Ils se manifestent sur tout ou partie de l'organisme de l'individu irradié. Ils provoquent des troubles variés pouvant aller de la mort quasi instantanée à une réduction significative de l'espérance de vie.

- Diminution des mécanismes de défense : une seule irradiation de 25 rems sur l'ensemble du corps tue immédiatement un grand nombre de cellules souches de certains globules blancs qui jouent un rôle important dans les mécanismes de défense de l'organisme vis-à-vis des germes infectieux et des cellules à potentialités cancéreuses ; d'où une fragilité - heureusement temporaire car de nouveaux globules blancs sont formés à partir de cellules survivantes disséminées dans l'organisme (ganglions lymphatiques, rate, thymus, moelle osseuse...).

- Effets somatiques différés, induction de leucémies et de cancers : appliqués à des doses faibles mais chroniques, les rayonnements ionisants peuvent induire dans plusieurs tissus divers types de cancers et de leucémies. Cette induction est d'autant plus facile que les réactions de défense contre les cellules dissidentes sont diminuées : nous venons de voir que les rayonnements interviennent également sur ces mécanismes. On a aussi montré qu'il y avait synergie (interaction et amplification) entre les radiations et d'autres facteurs nocifs, tels que le tabac par exemple, ce qui multiplie les risques d'induction de cancer.

b. Les effets génétiques (de *genetes* = père) touchent les cellules sexuelles assurant la reproduction. Ils n'apparaissent que dans l'organisme des descendants de l'individu irradié. Ils peuvent avoir une action stérilisante partielle ou totale, réversible ou définitive, ou provoquer des mutations dont certaines peuvent être létales.

La sensibilité d'un organisme aux effets des radiations dépend de son état physiologique aussi bien que de son génotype (ensemble de l'information contenue dans le matériel génétique, caractéristique de chaque individu). En particulier, l'effet des radiations est plus important sur des organismes en croissance : les jeunes et, a fortiori, les embryons sont beaucoup plus vulnérables que les adultes. Une mutation n'est pas for-

cément néfaste car elle peut faire apparaître un caractère avantageux. Les phénomènes complexes de sélection naturelle peuvent conserver ou éliminer ces caractères.

Par ailleurs, les êtres vivants disposent de systèmes qui peuvent réparer certaines lésions des acides nucléiques. Aux **doses faibles**, la plupart des radiolésions sont réparées, mais, lorsque la dose augmente, les systèmes de réparation sont progressivement saturés.

Cette réparation, cependant, ne se fait pas toujours correctement, elle peut faire apparaître une structure stable mais modifiée. D'autre part, les systèmes de réparation peuvent eux-mêmes être lésés par les radiations. Et des agents tels que la caféine, les antimalariaux ou la vitamine A sont des inhibiteurs des systèmes de réparation.

4. Effets de doses - notion de seuil

Il est nécessaire de distinguer **les effets d'une irradiation** brève à de fortes doses de ceux d'une exposition prolongée ou permanente aux faibles doses : les risques inhérents à la contamination radioactive de l'environnement correspondent à ces derniers. Les fortes doses de rayonnement provoquent la mort des individus exposés. Les doses plus faibles provoquent un certain nombre de perturbations physiologiques : ralentissement de la croissance, diminution de la résistance aux poisons, de la capacité de défense immunitaire (qui joue également un rôle dans l'induction de cancers, comme nous l'avons déjà vu), baisse de la longévité, stérilisation partielle ou totale (tableau ci-dessous).

Doses en rems	Effets après l'exposition
100 000	Mort dans les minutes qui suivent
10 000	Mort dans les heures qui suivent
1 000	Mort dans les mois qui suivent
700	90 % de mortalité dans les mois qui suivent
> 600	Troubles sanguins et digestifs graves Diarrhées et vomissements Risques de perforations intestinales La mort peut survenir dans les 15 jours
De 250 à 400	Nausées, vomissements, vertiges dès la fin de l'irradiation Modification de la formule sanguine Risques mortels élevés en cas d'infection
200	10 % de mortalité dans les mois qui suivent
De 100 à 250	Troubles digestifs légers Épilations partielles Fatigabilité persistante (plusieurs mois) Troubles sanguins généralement sans gravité
100	Aucune mortalité Augmentation significative des cas de cancers Stérilité permanente chez la femme Stérilité pendant 2 à 3 ans chez l'homme
A partir de 5	Modification de la formule sanguine

Toutes ces perturbations ne semblent se manifester qu'à partir d'une dose critique au-dessous de laquelle elles ne sont pas décelées. Par contre, pour des doses encore plus faibles, provoquant des perturbations somatiques différées (induction de cancers) ou des effets génétiques (mutations), **la notion de seuil** de nocivité est contestée. Ceci apparaît nettement si on compare les estimations par différents auteurs des effets pathologiques des faibles doses d'irradiation (tableau ci-dessous). La dose de 170 mrems/an considérée par la CIPR comme dose maximale admissible (DMA) pour la population est justifiée de la façon suivante par la Commission : « Cette limite ne représente peut-être qu'un équilibre approximatif entre la nuisance possible et les bienfaits éventuels, à cause de la difficulté d'évaluer les risques et les bienfaits qui justifient l'exposition⁷. »

**VARIATIONS DANS L'ESTIMATION
DES EFFETS PATHOLOGIQUES
DES FAIBLES DOSES D'IRRADIATION
(170 mrems/personne/an)
(chiffres ramenés à la population française)**

Auteurs	Temps de latence selon le mode de l'administration	Nombre de cancers supplémentaires	Nombre de morts supplémentaires dues à des causes génétiques
Gofman et Tamplin (1970)	In utero 5 ans, autrement 10 ans	8 000	44 000 à 440 000
Académie nationale des Sciences (USA, 1972)	In utero 0 an, autrement 2 à 3 ans	1 000 à 1 400	12 500 à 125 000 (maladies d'origine chromosomique) 2 500 à 25 000 (maladies congénitales ou maladies de dégénérescence)
Linus Pauling		20 000	

Une des difficultés principales réside dans le fait qu'un temps de latence très long peut s'écouler entre l'irradiation et l'expression de son effet : cancer ou mutation dans la descendance. La relation cause-effet n'est donc pas facile à établir pour un individu donné, et seules des études statistiques très poussées peuvent mettre en évidence cette relation. Il semble que l'accumulation d'irradiations successives joue également un rôle important.

Des travaux de plus en plus nombreux montrent l'absence de seuil dans l'induction de cancers ou de mutations⁸.

En conséquence, « l'hypothèse la plus raisonnable consiste à considérer que toute dose de rayonnement présente un risque de carcinogenèse ou de mutagenèse pour une fraction de la population⁹ ».

3. Le contrôle et les normes

Le « contrôle extrêmement strict des rejets radioactifs », même cautionné par « les plus grandes autorités médicales compétentes » (p. 25 du rapport d'Ornano), suffit-il à prévenir la pollution radioactive de notre environnement ? Cela est douteux car un facteur est difficile à bien connaître et surtout à quantifier : il s'agit, comme nous l'avons dit au chapitre précédent, de la faculté qu'ont les êtres vivants de concentrer des éléments, qu'ils soient radioactifs ou non. Même si le SCPRI essaie de définir les normes de rejet en tenant compte des possibilités de concentration, la circulation de la matière - dans l'atmosphère, les eaux fluviales, et surtout le milieu marin - représente un problème tellement complexe qu'il ne suffit pas d'affirmer qu'« il n'est procédé à aucun rejet liquide sans que la radioactivité ait été au préalable mesurée » et que « le personnel de l'installation effectue toutes mesures nécessaires dans le voisinage, de manière permanente, afin de déceler immédiatement toute éventuelle modification et d'en rendre compte aussitôt au SCPRI » (rapport d'Ornano).

Mais ce qui est grave, c'est que, l'électronucléaire étant présenté comme un impératif économique, les responsables de la radioprotection sont soumis à de fortes pressions en vue d'assouplir les normes de rejets d'effluents et d'augmenter les doses maximales admissibles pour le personnel des installations nucléaires, dans le but d'accroître la rentabilité. Déjà le SCPRI, dans le cadre des « rejets concertés pour nécessité de service » peut autoriser des dépassements de dose. Par exemple, le cas s'est produit dans la Meuse en 1973, où des rejets 5 fois plus élevés que les normes ont été autorisés par le SCPRI.

Or la connaissance des effets biologiques des rayonnements ionisants comporte de trop nombreuses lacunes pour qu'il soit possible de prédire ce qui va résulter de l'expansion de l'industrie nucléaire. Nous ignorons encore quels seront les effets des doses faibles mais chroniques de contamination de notre organisme qui vont insidieusement polluer notre milieu, l'air que nous respirons, les aliments que nous ingérons - et cela même dans l'hypothèse peu réaliste de l'absence totale d'incidents de fonctionnement. Comme nous l'avons dit pour l'induction de cancers et de mutations génétiques, ces effets risquent de ne se révéler qu'après une longue période de latence. Même si les émissions de radionucléides artificiels sont arrêtées, les produits déjà rejetés continueront d'agir et les manifestations biologiques d'apparaître.

Il nous semble enfin très néfaste que les contrôles de pollution radioactive soient tenus secrets. Les membres du SCPRI font en effet le serment, lors de leur entrée en fonction, de « ne rien révéler ou utiliser de ce

qui sera porté à leur connaissance » (cf. p. 58). Inévitablement, cet état de fait amène le SCPRI à dissimuler certaines situations embarrassantes. Dans le cas récent de [la pollution radioactive de la nappe phréatique de la région de Grenoble](#), il est manifeste que le SCPRI a essayé d'étouffer l'affaire.

En conclusion, l'optique de l'expansion de l'électronucléaire nous engage dans un processus difficilement réversible dont les impacts sur la santé sont encore loin d'être prévisibles.

10. Quelques remarques au sujet des problèmes économiques

Le projet gouvernemental d'avenir énergétique pour la France est fondé sur le développement de l'énergie électrique d'origine nucléaire. Nous allons essayer de comprendre ce projet et d'en analyser quelques implications sur le plan énergétique et financier, en prenant comme base les courbes de la figure 1 qui décrivent l'évolution de la consommation d'énergie envisagée en France dans les 25 prochaines années.

1. L'électronucléaire assure-t-il l'indépendance énergétique de la France ?

Nous remarquons que la consommation des combustibles fossiles (pétrole et charbon) utilisés directement reste constante de 1973 à l'an 2000. Cela signifie concrètement que [la dépendance de la France vis-à-vis de ses importations pétrolières restera la même](#) qu'aujourd'hui, la part du charbon national se maintenant à un niveau relativement bas (33 mégatec pour le charbon, contre 160 mégatec pour le pétrole).

La deuxième caractéristique de ce projet est une augmentation très importante de l'utilisation de l'uranium comme source d'énergie. Ceci ne pourra être obtenu que par l'importation car les réserves françaises - évaluées à 60 000 tonnes d'uranium naturel (rapport annuel du CEA 1973, p. 9) - ne permettent le fonctionnement de 50 tranches de 1 000 MWé que pendant 10 ans, alors que cet objectif devrait être atteint vers 1985, si les prévisions du VII^e Plan se réalisent.

La mer est souvent présentée comme une source d'uranium inépuisable ; cependant, sa teneur en uranium est faible : 3 grammes pour 100 tonnes d'eau. L'énergie nécessaire à son extraction serait loin d'être négligeable. De plus, le procédé d'extraction n'est pas au point. La France dépendra donc de l'étranger pour son approvisionnement en minerai d'uranium. En aurait-elle suffisamment qu'elle n'aurait pas les moyens industriels d'enrichir ce minerai : il est prévu qu'Eurodif 1 entre en service vers 1980, mais cette usine ne suffira pas aux besoins français, car elle aura aussi des clients étrangers.

ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE

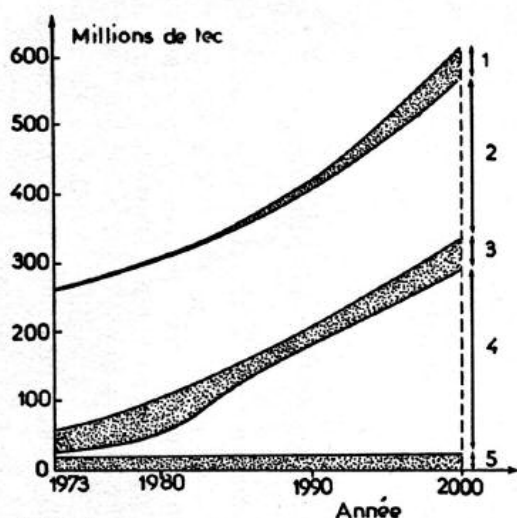


Figure 1

1. Énergies nouvelles
2. Combustibles fossiles utilisés directement
3. Combustibles fossiles transformés en électricité
4. Électricité d'origine nucléaire
5. Électricité d'origine hydraulique

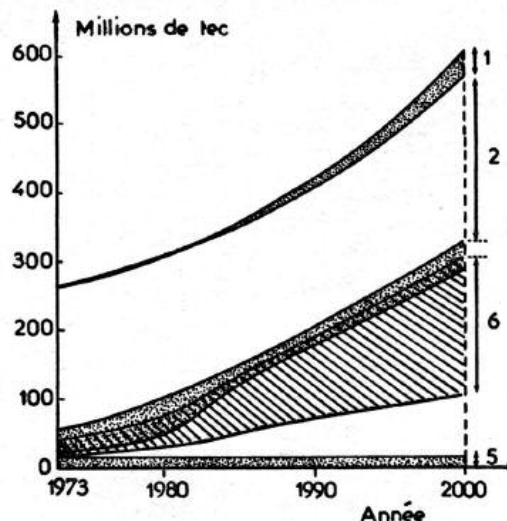


Figure 2

6. Chaleur rejetée dans l'environnement

2. Rendement et bilan énergétique dans l'utilisation de l'électricité

1. Aspects physiques de la production d'énergie

La transformation d'une énergie thermique en électricité s'effectue avec un certain rendement : ce rendement est limité par un principe fondamental de la physique, le principe de Carnot. Pour une centrale thermique classique, il peut atteindre 45 % ; pour une centrale nucléaire PWR, il n'est que de 33 %. Ceci signifie que pour produire une quantité d'énergie électrique donnée, une centrale nucléaire dissipe dans l'environnement une quantité d'énergie 2 fois plus élevée sous forme de chaleur. On appelle énergie primaire l'énergie consommée par la centrale ; le tiers de cette énergie seulement (énergie secondaire) est disponible sur le réseau EDF.

2. Électricité et coûts domestiques

Les courbes de la figure 1 représentent en fait l'évolution de la consommation d'énergie primaire : elles incluent donc toute la part d'énergie inutilisée, dispersée dans la nature. A ce sujet, il est important de souligner une inexactitude qui entretient la confusion. En effet, 3 000 kWh = 0,33 tec et non 1 tec (comme cela est écrit dans les textes officiels), car 0,67 tec est perdu sous forme de chaleur dans l'environnement lors du fonctionnement du réacteur nucléaire. Les courbes officielles d'évolution de la consommation d'énergie induisent donc en erreur. On peut utiliser cette image : 1 kWh fera bouillir 10 litres d'eau sur une cuisinière électrique, alors que pour produire 1 kWh dans une centrale nucléaire il faudrait faire bouillir 30 litres d'eau. Tout dépend en fait de quelle énergie on parle : énergie utilisable ou énergie dépensée.

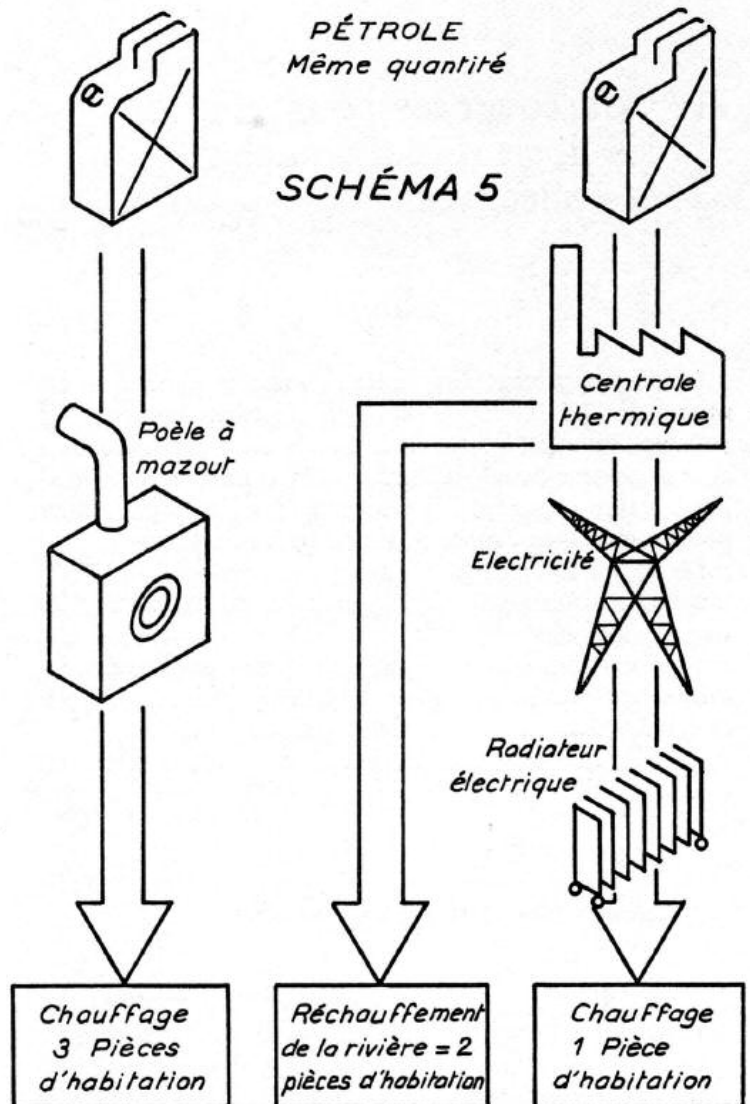
Pour connaître la production réelle d'électricité à partir du graphique précédent, il faut diviser par 3 la zone appelée « total d'électricité ». C'est pourquoi nous avons hachuré, dans la figure 2, l'énergie renvoyée dans l'environnement sous forme de chaleur et qui ne peut, en aucun cas, être considérée comme énergie consommée.

Toute utilisation d'énergie électrique pour le chauffage des appartements est donc à éviter ; nous pouvons illustrer ceci de la façon suivante : se servir d'un radiateur électrique pour chauffer une pièce implique la dissipation au niveau de la centrale d'une quantité de chaleur qui pourrait suffire à deux autres pièces (schéma 5).

Utiliser l'électricité comme moyen de chauffage est donc une absurdité du point de vue énergétique, qui se traduit sur le plan financier par un coût réel deux fois plus élevé pour l'électricité que pour le pétrole. A ce propos, l'Agence pour les économies d'énergie a vivement critiqué le **chauffage électrique** intégré, lors des travaux préparatoires au VII^e Plan, et a demandé sa suppression totale, mais la direction d'EDF a réussi à imposer que 2 millions de logements soient chauffés par ce procédé en 1985.

L'évolution historique s'est traduite jusqu'ici par l'exploitation de la source d'énergie considérée comme la plus « économiquement rentable ». C'est ainsi que l'ère du charbon a disparu au profit de celle du pétrole qui, à son tour, tend à être supplantée par le nucléaire. Aucune considération de nuisance, de gaspillage et de dilapidation des ressources naturelles n'a été prise en compte par les pouvoirs publics.

Il y a plus grave : le coût du programme actuel représente un tel investissement qu'il exclut toute recherche sérieuse d'énergie de remplacement, ce qui, une fois de plus, mettra notre pays en position vulnérable car son économie reposera sur une seule source d'énergie électrique : en 1985, 70 % de l'électricité doivent être d'origine nucléaire.



11. Conséquences pour les libertés individuelles et collectives

Le développement des centrales s'accompagnera nécessairement d'un développement sans précédent des contrôles policiers. En effet, les quantités de matières fissiles stockées et transportées dans quelques années vont être considérables : à titre d'exemple, il y aura 50 tonnes de plutonium produit par an en France dans une vingtaine d'années ; or il suffit de 5 à 10 kg de plutonium pour la fabrication d'une bombe, ce qui représente un volume de la taille d'un pamplemousse.

Pour éviter sabotage et vol, un **appareil policier** important devra être mis en place auprès des usines de fabrication des éléments combustibles, des centrales, des moyens de transport, des usines de retraitement et des aires de stockage.

1. Système policier de surveillance nucléaire

Tout d'abord, un important réseau policier national ne dépendant pas des autorités locales ou régionales devra être chargé de la surveillance des centrales, des usines et des convois de transport de matière fissile entre la centrale et les usines de production ou de retraitement. Ces transports seront en majorité des transports à longue distance du fait du petit nombre de ces usines et de la dispersion des centrales (en ce qui concerne le retraitement des déchets, dans les 15 prochaines années, une seule usine est prévue, à La Hague près de Cherbourg).

A côté de ce système policier visible, un réseau secret, du type contre-espionnage ou Interpol, surveillera toutes les personnes ayant accès de près ou de loin aux matières nucléaires. La création de ce réseau est d'ores et déjà évoquée aux États-Unis. D'après les responsables américains, ce réseau sera nécessairement international et analogue à celui de la lutte contre la drogue.

2. Entrave aux libertés

La construction des centrales nucléaires se heurte actuellement à l'opposition quasi générale des populations, conseils municipaux, et parfois même conseils généraux, comme dans le cas du surgénérateur Super-Phénix. Aux demandes de débats publics, de moratoire ou d'informations, la réponse officielle a été l'envoi de policiers en armes et la répression brutale.

Il est à craindre que le développement de l'énergie nucléaire n'entraîne dans l'avenir **une restriction des libertés** politiques et syndicales pour beaucoup de citoyens. En effet, l'industrie nucléaire aura une telle importance dans la vie du pays que le gouvernement ne pourra tolérer que les travailleurs des centres nucléaires disposent des mêmes droits que les autres travailleurs. Ces restrictions risquent d'être étendues aux habitants des régions proches des centrales pour éviter que les luttes sociales et politiques ne perturbent la bonne marche du réseau nucléaire. Les exemples récents d'intervention des forces de police sur les sites des futures centrales* (Creys-Malville, Braud-Saint-Louis, etc.) sont à ce propos très révélateurs.

Dans le contexte actuel, on ne peut exclure que les centrales nucléaires soient utilisées comme moyen de chantage par des groupes terroristes. Les risques courus par la population peuvent être à ce moment-là très importants (terroristes retranchés dans une centrale ou détournement d'un camion de matière radioactive). De plus, devenues sources quasi exclusives d'énergie électrique en France, leur arrêt provoquerait la paralysie économique du pays.

En cas de guerre, les centrales nucléaires sont des objectifs de choix car leur destruction contaminerait toute une région.

En conclusion, la prolifération des centrales nucléaires justifiera pour des raisons de sécurité la limitation de tous les mouvements politiques ou revendicatifs à tous les niveaux : local, national ou international. Quel gouvernement pourra s'en donner les moyens, et à quel prix pour les libertés individuelles et collectives ?

* Les récents incidents au Pellerin, près de Nantes montrent à l'évidence que la situation se dégrade : cinq paysans qui s'opposaient à l'enquête d'utilité publique ont été condamnés à des peines de prison. En juillet 1977, **la manifestation de Creys-Malville** a fait un mort et deux blessés graves parmi les manifestants.

12. La prolifération de l'arme nucléaire

A la différence de toutes les autres sources d'énergie (combustibles fossiles, énergie hydraulique, énergie solaire, géothermie), l'énergie nucléaire a des applications militaires directes.

Il existe deux grandes catégories de bombes atomiques : les bombes A (à fission), qui dégagent en général une énergie correspondant à celle de quelques milliers de tonnes de TNT, et les bombes H (à fusion), dont l'énergie est estimée en mégatonnes (millions de tonnes de TNT). L'explosion d'une bombe A sur une ville tue sur le coup une centaine de milliers de personnes (Hiroshima, Nagasaki) ; avec une bombe H, il y aurait plusieurs millions de victimes.

Actuellement, la bombe A est une étape obligatoire vers la bombe H. Il existe deux types de bombes A : les bombes à uranium très enrichi (uranium 235 presque pur) et les bombes au plutonium. La fabrication de la bombe A nécessite donc soit un enrichissement très poussé de l'uranium naturel, soit la fabrication de plutonium, élément qui n'existe pas dans la nature.

Le seul procédé d'enrichissement qui fonctionne actuellement à l'échelle industrielle est celui de la séparation isotopique par diffusion gazeuse ; il n'est à la portée que de quelques rares pays à haut niveau technologique (prix de cette technologie : environ 2 milliards de dollars).

Il a été utilisé à des fins militaires aux États-Unis, en URSS, en Grande-Bretagne, en France et en Chine. Mais d'autres procédés plus simples sont en cours de mise au point (ultracentrifugation, laser*), en principe à des fins pacifiques. Les prix de revient de ces techniques seront beaucoup plus bas : ultracentrifugation : 30 millions de dollars ; laser : 1 million de dollars.

La réalisation puis la diffusion de ces procédés permettront à de nombreux pays ([Afrique du Sud](#) et [Brésil](#) pour l'instant) de fabriquer des bombes à uranium 235. Cependant, la voie royale de [la prolifération de l'arme nucléaire](#) est actuellement la fabrication de plutonium dans les centrales nucléaires que l'on exporte un peu partout. Contrairement à une certaine propagande officielle, ce plutonium [se prête tout à fait bien à la fabrication de bombes A](#). La présence des isotopes ^{240}Pu et ^{242}Pu fait simplement passer la « masse critique » nécessaire de 4,4 kg (^{239}Pu pur) à 7 kg pour le plutonium extrait des PWR et 10 kg pour le plutonium des surgénérateurs. Le grand spécialiste américain des armes nucléaires, Carson Mark, déclare que l'on peut faire des bombes A avec n'importe quel plutonium issu de centrales nucléaires. Le phénomène de « préignition » dû à la présence de ^{240}Pu et de ^{242}Pu rend leur fabrication plus délicate mais tout à fait possible. Des essais militaires américains ont même été réalisés et se sont révélés concluants.

Le plutonium est pour le moment difficile à extraire, car le combustible neuf des PWR n'en comporte pas, et le combustible irradié est inapprochable (émission de rayons γ , produits de fission) et doit être manipulé à distance derrière des écrans de protection. L'[Inde](#) (explosion du [18 mai 1974](#)) et probablement [Israël](#) ont réussi à fabriquer la bombe A de cette façon. D'[autres pays](#)** se sont [portés acheteurs d'usines](#) de retraitement, cherchant à brûler les étapes. Le contrat entre la France et la Corée du Sud*** a été dénoncé mais ceux qui lient l'Allemagne de l'Ouest au Brésil et la France au [Pakistan](#) restent valables.

Enfin, avec l'avènement du recyclage du combustible et des surgénérateurs, il n'y aura plus besoin d'installations de retraitement pour les pays importateurs de centrales, et la prolifération de l'arme nucléaire pourra se développer à très grande vitesse. En effet, le combustible neuf sera constitué d'un mélange plutonium-uranium, sans émetteur γ ni produits de fission, donc relativement facile à manipuler et à traiter chimiquement pour en extraire le plutonium.

Pour terminer, il faut souligner le caractère illusoire des contrôles exercés par l'Agence internationale de l'Énergie atomique (AIEA) : cette agence dispose de 80 inspecteurs pour surveiller plus de 300 installations dans le monde. Même si les moyens de l'Agence étaient considérablement augmentés, n'importe quel pays s'estimant en mesure de fabriquer la bombe pourra dénoncer les contrats et au besoin expulser *manu militari* contrôleurs de l'AIEA et techniciens étrangers.

* Le laser n'est toujours pas utilisé industriellement en 2009, c'était donc une voie sans avenir.

** [A propos de prolifération](#): Voir, l'[Irak](#), l'[Iran](#)...

*** et aussi [Corée du Nord](#)

13. Conclusion

Il apparaît, au terme de cette étude, que le développement massif du nucléaire présente des risques graves pour les raisons suivantes :

1. La pollution radioactive est inévitable et a des conséquences irréversibles sur l'humanité et l'environnement. Les risques concernant la santé publique sont certains et les plus inquiétants sont les risques génétiques.

2. Des déchets hautement radioactifs sont produits en très grande quantité. Leur stockage ne peut être garanti pendant des siècles, encore moins des millénaires : une contamination irrémédiable du milieu naturel peut donc se produire.

3. Des accidents, hélas inévitables, risquent d'avoir des **conséquences catastrophiques** aussi bien pour les personnels travaillant dans les centrales que pour les populations avoisinantes.

4. Le choix que fait la France (et aussi l'URSS mais plus prudemment) de miser sur les surgénérateurs, présente un risque au niveau du retraitement, dans lequel on s'engage en France d'une manière précipitée pour récupérer le plutonium. On a vu que le retraitement, conçu comme une activité commerciale, présente de gros risques aussi bien pour les personnes travaillant dans ces usines que pour l'environnement.

5. La politique d'exportations multiplie les risques de prolifération de l'arme nucléaire.

Dans l'état actuel du programme électronucléaire, nous ne pensons pas que les risques aient été bien évalués. De plus, nous attirons l'attention sur l'aggravation potentielle de ces risques par la manière dont sont définies et appliquées les normes de sécurité dans l'industrie. On sait, par exemple, que la pollution des centrales thermiques classiques et des industries chimiques est très importante et que très peu est fait pour l'éviter, voire pour appliquer les règlements en vigueur, alors que des solutions techniques relativement peu coûteuses existent. Maintenant, on se propose de développer une industrie nucléaire massive pour laquelle les normes de sécurité prendront une dimension nouvelle. Peut-on réellement penser que cette fois tout sera fait pour que ce développement se déroule en toute sécurité, alors que l'on a affaire à des coûts sociaux beaucoup plus élevés, ainsi qu'à des problèmes techniques non encore résolus (par exemple, le problème du traitement et du stockage des déchets) ? Déjà, certains milieux officiels déplorent les normes de sécurité actuelles, jugées trop contraignantes, et responsables selon eux de la difficulté pour l'industrie nucléaire de se développer de manière « compétitive ».

En conséquence, nous pensons qu'il faut interrompre le programme gouvernemental d'implantation de centrales nucléaires, et adopter un moratoire de plusieurs années pour permettre de mieux apprécier les risques d'une telle entreprise. De plus, ce délai de réflexion pourrait être mis à profit pour permettre aux personnes ou organismes compétents de faire des propositions quant à l'utilisation d'autres sources d'énergie. Il est indispensable, étant donné l'ampleur du problème, que tous ces aspects soient débattus par l'ensemble de la population. Tel est le but de notre contribution.

Références

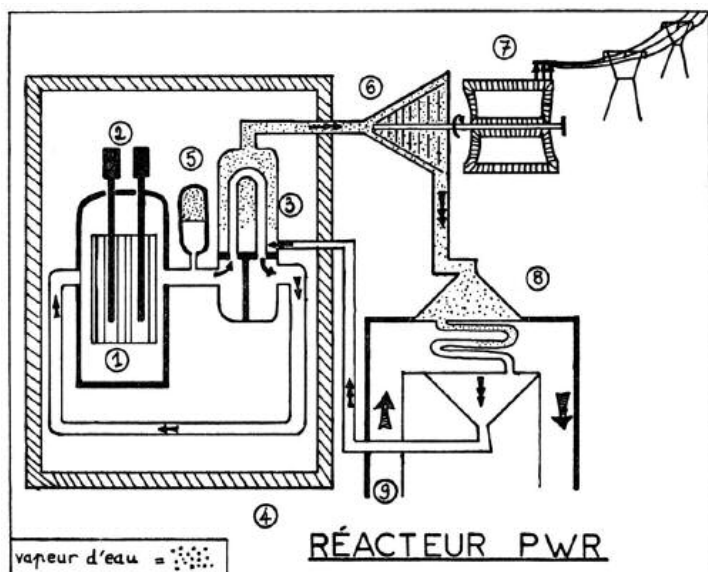
1. Thomas H. Pigford, « Environmental Aspects of nuclear energy production », *Annual Review of Nuclear Science*, 24, 1974, p. 515.
2. Henry W. Kendall, « Preliminary Review of the AEC reactor safety study », *Joint Review Committee*, nov. 1974.
3. Cf. *Questions sur le nucléaire - Les risques d'accidents dans les centrales nucléaires*, Éditions Christian Bourgois, 1975.
4. R. Schaeffer, « Incidence des reconcentrations radioécologiques sur la valeur de la concentration maximale admissible des eaux de rivière », EDF, IAEA SM 184/22, 1974.
5. P. Bovard, « Étude radioécologique du bassin rhodanien », *Symposium d'Aix-en-Provence*, IAEA, CEA, 1973.
6. N. Kochupillai et coll., « Down's Syndrome and Related Abnormalities in an area of high background radiation in coastal Kerala », *Nature*, 262, 1976, p. 60-61.
7. EURATOM, « Normes de radioprotection », Directives des Conseils des 2 février 1959, 5 mars 1962, 27 octobre 1966.
8. G. G. Nayar, K. P. George et A. R. Gopal-Ayengar, *Radiation Botany*, 10, 1976, p. 287-292.
9. F. Ramade, *Éléments d'écologie appliquée*, Ediscience, 1974.

Annexes

1. Le fonctionnement d'un réacteur PWR (Westinghouse)

1. Le cœur du réacteur nucléaire est formé d'un assemblage de crayons de combustible sous gaine (environ 4 m de long) autour desquels circule l'eau sous pression. Le combustible est de l'oxyde d'uranium enrichi à 3,5 % d'uranium 235. La réaction nucléaire en chaîne qui a lieu dans le cœur dégage une importante quantité de chaleur évacuée par l'eau du circuit primaire (flèche →), qui est très radioactive.

2. Des barres de contrôle qui peuvent glisser entre les gaines de combustible permettent de réguler les réactions nucléaires au sein du cœur du réacteur, donc d'assurer un contrôle du dégagement de chaleur.



3. Un échangeur de chaleur transmet la chaleur de l'eau du circuit primaire (flèche →) à l'eau du circuit secondaire (flèche →>).

4. L'enceinte de confinement, en principe **complètement étanche**, enferme tous les éléments radioactifs du réacteur.

5. Le pressuriseur maintient la pression du circuit primaire à 150 atmosphères, d'où le nom de ce type de réacteur : réacteur à eau sous pression (*Pressurised Water Reactor* = *PWR*).

6. La turbine est mise en mouvement par la vapeur du circuit secondaire.

7. L'alternateur transforme ce mouvement rotatif en courant électrique.

8. Le condenseur refroidit la vapeur du circuit secondaire, afin de créer le point froid nécessaire au fonctionnement de la turbine.

9. Une quantité très importante d'eau (flèche →>) est nécessaire pour refroidir le condenseur.

2. Principe de fonctionnement d'un réacteur surgénérateur type Phénix

1. Le cœur du réacteur nucléaire est formé d'un assemblage de crayons de combustible sous gaine, autour desquels on fait circuler un courant de sodium liquide. Les crayons de combustible comprennent environ 20 % d'oxyde de plutonium et 80 % d'oxyde d'uranium. Le cœur du réacteur dégage une énorme quantité de chaleur (500 kW/litre) évacuée par le sodium du circuit primaire (flèche →) qui est hautement radioactif.

2. Les barres de contrôle permettent de réguler les réactions nucléaires en chaîne afin de piloter le réacteur.

3. Un circuit de sodium secondaire (flèche →) évacue la chaleur accumulée dans le circuit de sodium primaire.

4. L'enceinte de confinement doit pouvoir contenir tous les produits radioactifs en cas d'explosion du cœur du réacteur ou d'incendie de sodium.

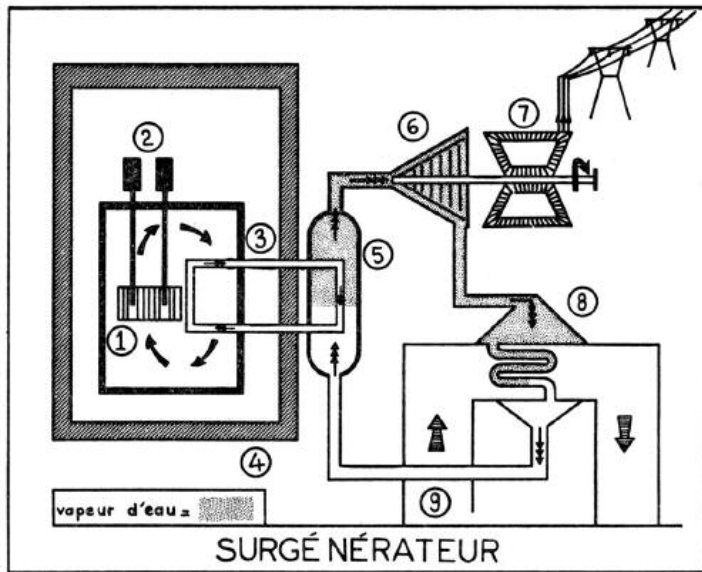
5. Un échangeur de chaleur transmet la chaleur du sodium du circuit secondaire (flèche →) à l'eau du circuit tertiaire (flèche →>>) qui est transformée en vapeur.

6. La turbine est mise en mouvement par la vapeur du circuit tertiaire.

7. L'alternateur transforme ce mouvement rotatif en courant électrique.

8. Le condenseur refroidit la vapeur du circuit tertiaire, afin de créer le point froid nécessaire au fonctionnement de la turbine.

9. Une quantité très importante d'eau (flèche →) est nécessaire pour refroidir le condenseur.



3. L'accident de référence de Super-Phénix

t = 0

Arrêt des pompes primaires de sodium et non-fonctionnement des barres de contrôle (causes possibles : pannes simultanées, tremblement de terre, sabotage sophistiqué).

Température initiale du sodium : $T = 500\text{ °C}$.

Puissance thermique initiale : $P = 3\,000\text{ MW}$ (correspond à une puissance électrique de $1\,200\text{ MW}$).

t = 1 mn

La température du combustible a augmenté, la réactivité a diminué (effet Doppler), et donc la puissance décroît. Mais la température du sodium est en augmentation rapide.

$T = 720\text{ °C}$; $P = 1\,800\text{ MW}$

t = 3 mn

$T = 850\text{ °C}$; $P = 1\,200\text{ MW}$

t = 6 mn

$T = 920\text{ °C}$; $P = 750\text{ MW}$

t = 9 mn

$T = 950\text{ °C}$; $P = 600\text{ MW}$

Le sodium est entré en ébullition, ce qui augmente la réactivité (effet de vide), et donc la puissance; les canaux où circule le sodium se « vidangent » les uns après les autres, ce qui augmente la réactivité par bonds.

t = 9 mn 3 s

$P = 700\text{ MW}$

t = 9 mn 5 s

$P = 1\,800\text{ MW}$

La puissance augmente de plus en plus vite car la réactivité approche du « seuil critique prompt ».

t = 9 mn 6 s

$P = 30\,000\text{ MW}$

On atteint le « seuil critique prompt ». C'est l'excursion nucléaire : le phénomène devient explosif.

t = 9 mn 6,06 s P = 100 000 MW
L'effet Doppler a ralenti un peu l'augmentation de puissance.

t = 9 mn 6,22 s P = 300 000 MW
Le cœur se sépare axialement sous l'effet de souffle de l'excursion nucléaire. Le tiers du cœur (35 tonnes d'oxyde d'uranium et de plutonium) a fondu. La séparation du cœur fait décroître brutalement la réactivité et la puissance.

t = 9 mn 6,25 s P = 10 000 MW

A partir de maintenant, deux possibilités :

1. Branche n° 1 : interaction Na-UO₂

t = 9 mn 6,3 s : interaction thermodynamique violente entre la partie fondue du cœur et le sodium liquide. Cette interaction provoque la formation d'une « bulle » de sodium qui va heurter de façon explosive la cuve et la dalle, libérant une énergie mécanique de 800 MJ* (ce qui correspond à 200 kg de TNT). La cuve et sa dalle sont conçues pour résister à 800 MJ, mais pas plus. En fait on ne sait pas quelle sera l'énergie libérée. Théoriquement (rendement 100 %), ce pourrait être 8 000 MJ. Pratiquement, ce peut être nettement moins de 800 MJ. L'incertitude est considérable.

2. Branche n° 2 : « compaction »

La partie supérieure du cœur retombe sur la partie inférieure. La réactivité augmente en flèche et franchit à nouveau le seuil critique prompt. Il se produit une deuxième excursion nucléaire, beaucoup plus rapide et explosive que la première (la puissance peut être multipliée par 1 000 en une milliseconde). Le cœur est vaporisé au moins partiellement (des calculs américains et allemands envisagent la vaporisation totale et des températures de 6 000 °C à 8 000 °C). Il s'agit d'une véritable explosion nucléaire. La détente de la « vapeur de combustible » libère ensuite une énergie mécanique explosive estimée officiellement à 800 MJ, mais qui pourrait être au moins 10 fois plus grande.

* MJ = mégajoule = million de joules.

4. Sûreté comparée des différentes filières de réacteurs

Les éléments défavorables au point de vue **sûreté** sont en gras. (Voir tableau ci-contre.)

Filière	Combustible (proportion de fissile en %)	Modérateur	Réfrigérant	Pression du modérateur (kg/cm ²)	Pression du réfrigérant (kg/cm ²)	Densité de puissance (kW/litre)	Temps de vie des neutrons (secondes)	Stabilité géométrique
Graphite gaz	Uranium naturel 0,7 % métal	Graphite	Gaz carbonique	Solide	30	1	10 ⁻³	Oui
Eau lourde	Uranium naturel 0,7 % oxyde	Eau lourde	Eau lourde	5	70	10	10 ⁻³	Oui
HTR	Uranium enrichi + thorium ~ 5 % carbure	Graphite	Hélium	Solide	40	5 à 10	10 ⁻⁴ à 10 ⁻³	Oui
PWR	Uranium enrichi 3 % oxyde	Eau ordinaire			150	100	10 ⁻⁴	Oui
Surgénérateur	Plutonium + uranium naturel 15 à 20 % oxyde	Il n'y en a pas	Sodium		3	500	10⁻⁷	Non
Bombe atomique	Plutonium ou uranium 235 100 % métal	Il n'y en a pas	Il n'y en a pas			~ 10 ¹⁷	10 ⁻⁹ à 10 ⁻⁸	Non

5. Problèmes de sûreté des réacteurs à neutrons rapides

1. Introduction : surgénérateurs et réacteurs à neutrons rapides

Tout réacteur utilise comme combustible le mélange d'un matériau *fissile* (^{235}U , ^{239}Pu ou ^{233}U , ces deux derniers n'existant pas à l'état naturel) et d'un matériau *fertile* (^{238}U ou ^{232}Th). Au fur et à mesure qu'il consomme sa charge initiale de matériau fissile, tout réacteur produit une certaine quantité de matériau fissile à partir du matériau fertile (^{239}Pu à partir de ^{238}U , ^{233}U à partir de ^{232}Th). Lorsque la quantité produite est supérieure à la charge initiale, le réacteur est dit *surgénérateur* (ou *surrégénérateur*). Actuellement, les seuls surgénérateurs qui fonctionnent sont des réacteurs à neutrons rapides. Mais il existe des réacteurs à neutrons rapides qui ne surgénèrent pas (ce sera le cas de SNR 300 en Allemagne), et on pourra peut-être construire des réacteurs à neutrons lents qui surgénèrent (dans la voie des réacteurs à sels fondus).

2. Neutrons rapides, neutrons lents

Lors de la fission, les neutrons émis sont dits *rapides* et ont une énergie cinétique de un à quelques MeV. On peut les ralentir en les faisant circuler dans un matériau *modérateur* (eau lourde, graphite, eau ordinaire). Leur énergie tombe alors à quelques centièmes d'eV et ils sont dits *lents* ou *thermiques*. Les corps fissiles cités plus haut ont une section efficace de fission qui croît lorsque l'énergie des neutrons décroît. Par exemple, pour ^{235}U , on a 1,5 barns* pour 1 MeV et 580 barns pour 0,025 eV**. Pour éviter que la réaction en chaîne ne s'étouffe en raison d'une capture trop importante dans les matériaux non fissiles, il n'y a que deux solutions

- concentrer fortement la matière fissile pour que les neutrons rapides produisent un nombre suffisant de fissions ; c'est le cas des réacteurs à neutrons rapides et de la bombe atomique ;
- répartir judicieusement la matière fissile dans un modérateur, afin de ralentir les neutrons et d'augmenter leur capacité de provoquer la fission ; c'est le cas des réacteurs à neutrons lents.

La différence entre neutrons lents et neutrons rapides est bien mesurée par leur *temps de vie* ϑ (temps moyen qui s'écoule entre l'émission d'un neutron et la nouvelle fission qu'il provoque). Ce temps est exprimé en secondes dans le tableau ci-dessous :

Réacteurs à neutrons lents			Réacteurs à neutrons rapides		Bombe atomique
Eau lourde (EL ₃)	Graphite-gaz	Eau ordinaire	Super-Phénix	Rapsodie	
2×10^{-3}	10^{-3}	10^{-4}	$3,8 \times 10^{-7}$	9×10^{-8}	10^{-9} à 10^{-8}

* 1 barn = 10^{-24} cm².

** 1eV = 1 électron-Volt = $1,6 \cdot 10^{-19}$ joule.

3. Neutrons prompts, neutrons retardés

Lors de la fission, un certain nombre de neutrons (en général 2 ou 3) sont émis quasi instantanément. Ce sont les neutrons dits instantanés ou *prompts*. Mais certains fragments de fission peuvent à leur tour, par décroissance radioactive, donner naissance à des neutrons dits *retardés*. Ces neutrons retardés ne représentent que quelques pour mille du total des neutrons (pour une charge neuve, les valeurs sont $\beta = 0,73$ % pour ^{235}U , $\beta = 0,37$ % pour ^{239}Pu , $\beta = 0,24$ % pour ^{233}U). Mais la réaction en chaîne est facilement contrôlable tant qu'ils lui sont nécessaires.

Précisons ce dernier point. Le réacteur est étudié de façon que, par suite du jeu des captures et des fuites, sur les 2 ou 3 neutrons émis lors d'une fission, un seul provoque une nouvelle fission. Le coefficient de multiplication k est alors égal à l'unité. Si ce coefficient augmente, la réaction en chaîne diverge. Mais tant que le nombre de neutrons prompts d'une nouvelle génération est inférieur au nombre de neutrons total de la génération précédente, ce sont les neutrons retardés qui gouvernent la réaction en chaîne, et elle est aisément contrôlable.

Lorsque le coefficient de multiplication atteint la valeur $1 + \beta$, dite *seuil critique prompt*, la réaction en chaîne s'accélère brutalement. Dès que l'on dépasse quelque peu ce seuil, le temps de doublement T_d de la puissance devient proportionnel au temps de vie ϑ , suivant la formule $T_d = \text{Log } 2 \vartheta / (k - 1 - \beta)$. On en déduit tout de suite qu'il y aura une différence considérable de comportement entre réacteurs à neutrons lents et réacteurs à neutrons rapides.

TEMPS DE DOUBLEMENT DE LA PUISSANCE		
k	Réacteur à neutrons lents	Réacteur à neutrons rapides
1,001	55 secondes	28 secondes
1,002	23 secondes	9 secondes
1,004	7 secondes	230×10^{-6} seconde
1,008	1 seconde	16×10^{-6} seconde

A titre d'exemple, le tableau précédent, qui applique la formule de Nordheim à un groupe moyen de neutrons retardés, donne les temps de doublement pour un réacteur à neutrons lents et ^{235}U ($\vartheta = 10^{-3}\text{s}$, $\beta = 0,73\%$) et pour un réacteur à neutrons rapides et ^{239}Pu ($\vartheta = 10^{-7}\text{s}$, $\beta = 0,37\%$), en fonction de différentes valeurs de k.

4. L'excursion nucléaire

Dans un réacteur à neutrons rapides, le franchissement du seuil critique prompt entraîne ce que l'on appelle une excursion nucléaire. Les temps de doublement étant de quelques dizaines ou de quelques centaines de microsecondes, il s'agit d'un processus explosif, moins rapide cependant que dans la bombe A, où le temps de doublement n'est que de 10 nanosecondes, en raison de la grande valeur du coefficient de multiplication.

Dans un réacteur industriel à neutrons lents, l'échauffement survenant lors du franchissement éventuel du seuil critique ralentit la réaction en chaîne (effet Doppler), puis l'arrête par une fusion partielle qui détruit la disposition rigoureuse et ordonnée nécessaire à cette réaction en chaîne dans un réacteur à neutrons lents, il paraît difficile d'avoir des temps de doublement inférieurs à la seconde, et en aucun cas on ne peut avoir explosion nucléaire.

Dans un réacteur à neutrons rapides, l'échauffement intervient pour ralentir la réaction en chaîne (encore que l'on peut avoir atteint des niveaux de puissance considérables), mais la fusion n'interrompt pas cette réaction, basée sur la concentration en matière fissile, et non sur la répartition judicieuse du combustible dans un modérateur. La réaction ne s'arrête que lorsqu'il y a dispersion explosive du combustible. Le phénomène est donc physiquement le même que dans la bombe atomique : **un réacteur à neutrons rapides peut physiquement exploser comme une bombe atomique**, même si pour des raisons technologiques la puissance de l'explosion est nettement inférieure : seules les bombes atomiques « artisanales » auraient sans doute une puissance du même ordre de grandeur que celle correspondant à l'excursion nucléaire d'un réacteur à neutrons rapides.

5. Le cas du réacteur Super-Phénix

Ce réacteur, d'une puissance de 1 200 MW électriques, et comportant 4 à 5 tonnes de plutonium, doit être construit entre Lyon, Grenoble et Genève.

1. L'excursion nucléaire semble improbable

La cause initiatrice la plus probable est un arrêt de la circulation du sodium primaire qui refroidit le cœur du réacteur, avec impossibilité de mouvoir les barres de contrôle et donc d'arrêter la réaction en chaîne. Nous allons évoquer trois origines possibles de ce phénomène (d'autres origines sont possibles).

a. *Panne simultanée des pompes primaires et des barres de contrôle.* C'est l'« accident de référence » étudié par les ingénieurs de sûreté. Il paraît évidemment très improbable, mais une étude complète des arbres d'événements pouvant y conduire, avec estimation quantitative de la probabilité, n'a pas encore été faite.

b. *Propagation rapide d'un défaut local.* Cet accident est considéré par les spécialistes allemands du Kernforschungszentrum de Karlsruhe comme le plus probable^{1,2}. Le phénomène est le suivant : à la suite d'un défaut local de refroidissement, un élément combustible fond partiellement, le contact entre le combustible fondu et le sodium provoque une petite explosion thermodynamique qui rompt des éléments voisins, lesquels subissent aussi des fusions partielles, et le phénomène se propage sur l'ensemble du réacteur en provoquant une déformation assez importante pour que les barres de contrôle ne puissent plus se déplacer, et pour que la circulation du sodium soit interrompue. Ce phénomène a été pris en considération en France³ et est étudié par le CEA⁴. Les études effectuées jusqu'ici ont montré des rendements de l'interaction combustible fondu-sodium ne dépassant pas quelques pour cent du rendement théorique maximum, ce qui est

insuffisant pour entraîner une propagation rapide d'une rupture. Cependant, le phénomène est théoriquement possible, les résultats des expériences dépendent de nombreux paramètres, et il est extrêmement difficile de chiffrer la probabilité du phénomène.

c. Tremblement de terre. Un tremblement de terre peut interrompre la circulation de sodium et déplacer les barres de contrôle par rapport à leur axe. Une étude a été effectuée sur un tremblement de terre assez fort ; le déplacement trouvé pour les barres a été de 1 cm, alors que les barres peuvent s'éloigner jusqu'à 3 cm de leur axe sans perdre leur capacité de fonctionner. Cependant il conviendrait de voir quel tremblement de terre peut provoquer un déplacement de 3 cm, et quelle est sa probabilité.

En résumé, si qualitativement l'accident semble improbable, compte tenu également de la surveillance au niveau de chaque assemblage à l'aide de thermocouples à haute performance, il paraît inconsidéré d'entamer la construction de Super-Phénix tant qu'une étude probabiliste quantitative complète n'aura pas été effectuée et tant que l'on n'aura pas une connaissance complète de l'interaction combustible fondu-sodium.

2. Le déroulement de l'excursion nucléaire est imprévisible

Le sodium ne circulant plus, et les barres de contrôle ne pouvant fonctionner, il se produit une ébullition du sodium. Or ce dernier capture des neutrons de façon non négligeable, et son ébullition se traduit par une forte diminution de sa densité (1 cm³ de sodium liquide donne 2 litres de sodium vapeur) et donc de cette capture. La réaction en chaîne s'emballe, et le seuil critique prompt est franchi.

Il se produit alors une première excursion nucléaire libérant une énergie de 30 000 mégajoules (MJ). Cette énergie, correspondant à celle libérée par 8 tonnes de TNT, est consacrée principalement à la fusion du tiers du cœur du réacteur (ce cœur comporte 35 tonnes de combustible nucléaire). Une partie relativement faible (100 MJ) est transmise à la cuve sous la forme d'énergie mécanique. Les dégâts provoqués sur la cuve, à même quantité d'énergie mécanique transmise, sont 2 fois plus importants dans le cas d'une excursion nucléaire que pour un explosif brisant classique du genre TNT⁵. Cependant la cuve et sa dalle de fermeture, prévues pour résister à 800 MJ, devraient résister à la première excursion nucléaire.

Ensuite les phénomènes deviennent plus difficiles à prévoir. On peut envisager une interaction violente entre les 10 tonnes de combustible fondu (à 3 000 °C environ) et le sodium. On estime que cette interaction dégagerait de 500 à 800 MJ et serait encore contenue. Mais on peut envisager également que le combustible se rassemble à nouveau en une masse surcritique prompte. En effet, la première excursion nucléaire provoque une dispersion axiale du combustible et la partie supérieure peut retomber sur la partie inférieure. Si l'on s'en tient à l'effet de la gravitation et aux quelques centimètres de hauteur de chute envisagés, le coefficient de multiplication peut augmenter à la vitesse de 0,2 par seconde lorsque le seuil critique prompt est à nouveau franchi. La deuxième excursion nucléaire est plus violente que la première et, si l'énergie totale libérée est du même ordre de grandeur, l'énergie mécanique est de 800 MJ, ce qui, compte tenu de la remarque faite plus haut, équivaut à 400 kg de TNT.

En réalité, d'autres forces que la gravitation peuvent intervenir, par exemple une interaction combustible-sodium dans le haut des assemblages peut précipiter la partie supérieure du cœur sur la partie inférieure. L'étude de ces forces est au programme des ingénieurs de sûreté pour les années qui viennent. Si l'on atteint une vitesse d'augmentation du coefficient de multiplication de 1,5 par seconde, le cœur de Super-Phénix (20 tonnes d'acier + 35 tonnes d'oxyde d'uranium et de plutonium) est porté à 8 000 °C⁶. L'énergie totale libérée correspond à 30 tonnes de TNT, et l'énergie mécanique à quelques tonnes.

3. Le confinement de l'excursion nucléaire est insuffisant

La cuve et la dalle de fermeture sont évidemment soufflées dans le cas d'une énergie mécanique libérée correspondant à plusieurs tonnes de TNT. L'enceinte de confinement prévue autour de la cuve et de sa dalle de fermeture n'est pas destinée à résister à une telle énergie, mais à contenir ce qui s'échapperait en cas de fissures de la cuve ou de la dalle. Elle ne résisterait pas à une libération d'énergie mécanique nettement supérieure aux 800 MJ prévus ; les spécialistes n'ont d'ailleurs pas effectué le « schéma de ruine » permettant de savoir quelle énergie peut être contenue.

A cet égard, la philosophie des spécialistes français est très différente de celle des anglo-saxons. Les premiers conçoivent des dispositifs de surveillance très raffinés pour éviter l'accident, et font confiance aux modèles et aux analyses. Les Anglo-Saxons disent nous ne pouvons peut-être pas tout prévoir, nos modèles de calcul sont peut-être inexacts, aussi nous allons prévoir une enceinte de confinement capable de résister à des dégagements d'énergie considérables. C'est le cas par exemple du projet britannique CFR (1 300 MWé), où l'enceinte de confinement prévue a un mètre d'épaisseur, contre quelques centimètres pour Super-Phénix. Mais une enceinte épaisse pose des problèmes au niveau des traversées (circuits de sodium, appareils de chargement-déchargement) et il risque alors d'y avoir des fuites en régime normal.

Une fois l'enceinte de confinement rompue, les milliers de mètres cubes de sodium du circuit primaire sont en contact avec l'air et prennent feu. Le bâtiment réacteur, prévu pour résister à une surpression interne de 40 millibars, ne résistera pas à cet incendie et aux « missiles » émis à partir de la cuve. La vapeur d'oxyde de plutonium, ou un aérosol sodium-plutonium, peut donc s'échapper. Rappelons pour finir que la dose mor-

telle de plutonium inhalé est estimée à 1 milligramme, et qu'il y en aura 4 à 5 tonnes dans Super-Phénix.

Références

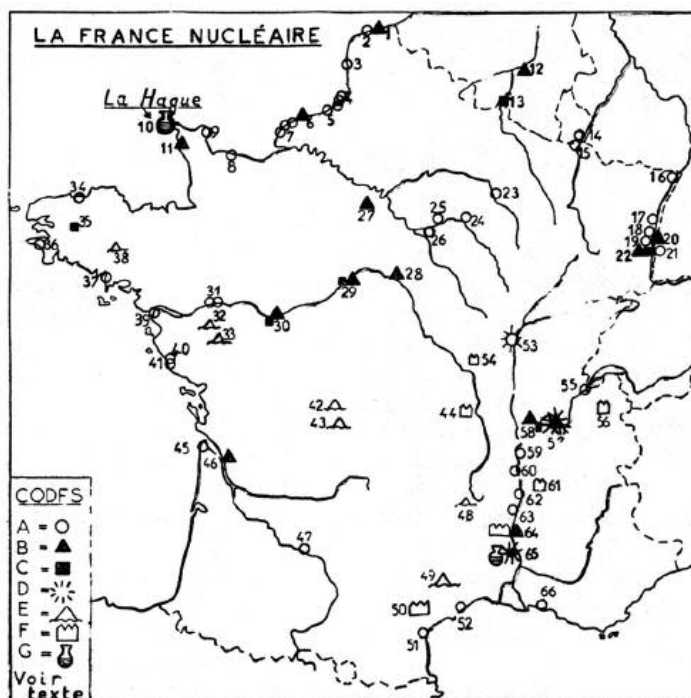
1. Kramer, Jacobi, Krieg, « Local Failure Propagation in LMFBRs », Conférence sur la maturité de l'énergie nucléaire, Paris, avril 1975.
2. Jacobi, Kramer, Schleisick, « Problem of pin-to-pin failure propagation in sodium-cooled fast breeder reactors », février 1975.
3. Puig, Antonakas, « Analysis of severe accidents in fast reactors of great power », CEN Cadarache, 1973.
4. Commissariat à l'Énergie atomique, *Bulletin d'informations scientifiques et techniques*, n° 210, janvier 1976.
5. Cowler, Hoskin, « Comparison of the pressure effects of energy release from nuclear excursions and chemical simulations », UKAEA, 1973.
6. Boudreau, Jackson, « Recriticality considerations in LMFBRs accidents » USA, 1974.

6. Carte des sites nucléaires

Il est difficile de dresser une carte exacte des sites nucléaires français actuels et à venir, dans la mesure où des éléments techniques et politiques peuvent largement influencer la stratégie d'implantation des centrales nucléaires : par exemple, l'adoption de techniques d'aérocondenseurs (cf. annexe 10) permettrait de s'affranchir de la contrainte qu'impose le refroidissement par eau (grands cours d'eau, bord de mer) ; de même, une contestation locale très ferme peut provoquer le glissement d'un site à un site voisin. Néanmoins, il est instructif de considérer ce que serait le quadrillage nucléaire de la France dans 10 à 20 ans si l'opinion publique laisse les grands monopoles créer ce nouveau « Tour de France de deux apprentis » (sorciers).

Pour prendre pleinement conscience de l'emprise de l'industrie nucléaire sur le territoire, il faut considérer le réseau de *transports de matières radioactives* qu'implique un tel programme : transports de minerais et de combustibles pour réacteurs entre les divers lieux d'extraction et de traitement (essentiellement le Centre et le Sud-Est), puis de là vers les centrales elles-mêmes ; mais, surtout, les très dangereux transports (par route, par rail ou par eau) de barreaux irradiés, hautement radioactifs, dirigés des centrales vers le grand centre de retraitement de [La Hague](#) à la pointe du Cotentin, qui sert également de lieu de stockage des déchets traités. C'est ainsi que des villes comme Lyon, Chalon, Tours ou Caen sont déjà ou vont devenir de grandes « gares nucléaires » où vont circuler, manœuvrer ou stationner les fameux « châteaux de plomb » contenant les combustibles irradiés. Des ports comme celui du Havre auront un important trafic nucléaire du même genre.

La carte de la France nucléaire doit être située dans son contexte international : c'est ainsi que nous avons indiqué les sites proches des frontières. Mais il faut voir plus loin que ces sites limitrophes. L'Espagne, la Suisse ou l'Allemagne ont de gros programmes nucléaires en perspective. Citons par exemple, pour l'Espagne, des projets importants sur la côte de Galice et en Catalogne - où la France a déjà construit [la centrale de Vandellós](#), près de Tarragone ; les rejets de ces centrales dans le golfe de Gascogne et le golfe du Lion concernent directement la France. De plus, comme les pouvoirs publics veulent faire jouer à notre pays un rôle pilote en matière de retraitement de combustibles irradiés, alors que la plupart des pays occidentaux hésitent sur la conduite à tenir, il faut s'attendre à un intense trafic international dans la région de La Hague (ce centre traite même des combustibles venant du Japon).



Liste des sites (figure)

Sur la figure, les sites sont marqués d'un numéro renvoyant au répertoire ci-dessous, et d'un signe indiquant les activités principales (voir en bas de la figure à gauche la lettre code correspondant à chaque signe).

- Code A (cercle vide) = site de centrale prévue dans les 20 prochaines années (source : *Document sur la localisation des centra-*

les nucléaires, ministère de l'Industrie et de la Recherche, novembre 1974).

- Code B (triangle noir) = centrale PWR en construction.

- Code C (carré noir) = centrale en fonctionnement :

a. du type graphite-gaz (filiale abandonnée en 1969) : monts d'Arrée (35), Chinon (30), St-Laurent-des-Eaux* (29), Bugey (58),

b. du type PWR : Chooz (13), Fessenheim (22) depuis le printemps 77,

c. du type surgénérateur : Marcoule (65), réacteur Phénix.

- Code D (rayons étoilés) : placés autour d'un des trois sigles A, B, C, ils indiquent un réacteur surgénérateur.

- Code E (terril) = mine d'uranium.

- Code F = usine de traitement de l'uranium.

- Code G = centre de traitement de combustibles irradiés.

Localités : (1) Gravelines, (2) Oye-Plage, (3) Dannes, (4) Val-Mesnil, Penly, Val-du-Prêtre, (5) St-Aubin, (6) Paluel, (7) Val-d'Ausson, Vattetot, Antifer, (8) Manvieux, (9) Barfleur, (10) La Hague, (11) Flamanville, (12) Tihange (Belgique), (13) Chooz, (14) Remerschen (Luxembourg), (15) Senez, (16) Lauterbourg, (17) Gerstheim, (18) Sundhouse, (19) Markolsheim, (20 et 21) Whyt et Vieux-Brisack (RFA), (22) Fessenheim, (23) Omev ou Couvrot, (24) Crancey ou Méry, (25) Nogent s/Seine, (26) Pont s/Yonne, (27) Saclay (centrales expérimentales), (28) Dampierre-en-Burly, (29) St-Laurent-des-Eaux, (30) Chinon, (31) Varades ou Ingrandes, (32) L'Ecarpière, (33) Mortagne s/Sèvre, (34) Beg-An-Fry, (35) Brennilis (monts d'Arrée), (36) Plogoff, (37) Erdeven, (38) Pontivy, (39) Corsept, (40) Brétignolles, (41) St-Martin-de-Brem, (42) Bessines, (43) La Crouzille, (44) St-Priest-la-Prugne, (45) Le Verdon, (46) Braud-St-Louis, (47) Golfec, (48) Langogne, (49) Lodève, (50) Malvézi, (51) Port-la-Nouvelle, (52) Sète, (53) Sennecey-le-Grand, (54) Gueugnon, (55) Verbois, (56) Annecy et Chedde, (57) Creys-Malville, (58) Bugey, (59) St-Maurice-l'Exil, (60) Arras, (61) Romans, (62) Soyons, (63) Cruas, (64) Pierrelatte (2 usines de séparation isotopique et 4 PWR), (65) Marcoule (surgénérateur Phénix, et centre de traitement d'éléments radioactifs), (66) Martignes.

Pour compléter ce panorama des installations nucléaires, il faut mentionner les lignes de câbles qui évacueront le courant des centrales vers les centres consommateurs. Pour une centrale nucléaire type (4 tranches de 1 gigawatt environ) il faut prévoir un couloir de câbles de 200 m de large. Les centrales étant en général assez éloignées des centres de consommation, la carte de France sera quadrillée par un réseau de tels couloirs de fils : par exemple les liaisons entre les centrales de la Manche ou du val de Loire et la région parisienne.

Au-delà de cette implantation visible de l'industrie nucléaire, il faut considérer une implantation moins visible et plus pernicieuse. Il faudrait en effet (en surimpression à la carte des sites) faire une carte de France des pollutions nucléaires probables (i.e. en régime normal, hors accident grave) qui montrerait que l'industrie nucléaire affectera non seulement certaines localités ou voies de communication, mais des zones écologiques entières : carte des fleuves aux eaux réchauffées de plusieurs degrés et chargées de tritium ; carte des côtes où les crustacés et poissons absorberont et concentreront les corps radioactifs rejetés dans les eaux d'épuration des centrales ou de La Hague (eaux de la Manche notamment) ; carte des vents emportant les vapeurs d'iode ou de krypton radioactifs. Mais cette carte-là, nul n'est encore capable de la dessiner avec exactitude, et c'est ce qu'il y a de plus dangereux dans le pari nucléaire actuel.

* **Note d'Infonucléaire**: Le 17 octobre 1969 à Saint-Laurent 1, réacteur graphite-gaz (480 MWé), fusion de 50 kg d'uranium lors d'une opération de chargement. La contamination serait restée limitée au site. Plus d'un an de réparations.

7. Les déchets provenant des centrales nucléaires

1. Composition du combustible irradié de réacteur PWR

Au taux de combustion de 33 000 MW jour/t, un réacteur PWR de 1 000 MWé fonctionnant à 100 % produit en une année les déchets suivants :

a. 100 à 300 m³ de déchets solides de faible activité (~ 1 Ci/m³),

b. 33 tonnes de combustibles irradiés.

Le tableau ci-contre indique la composition des 33 tonnes de combustibles irradiés lors du déchargement. Les rejets de produits radioactifs dans l'environnement ne figurent pas dans ce tableau.

	Activité	Principaux produits	
Produits de fission	3970 MCi	Tritium	24 100 Ci 12,26 ans
		⁸⁵ Kr	383 000 Ci 10,76 ans
		⁹⁰ Sr	2,58 MCi 27,7 ans 16 kg
		¹²⁹ I	1 Ci 1,7 × 10 ⁷ ans 6 kg
		¹³¹ I	23,9 MCi 8,05 jours
		¹³⁷ Cs	43,8 MCi 30,0 ans 45 kg
Actinides	1 198 MCi	²³⁸ Pu	2,8 kg
		²³⁹ Pu	171,4 kg
		²⁴⁰ Pu	73,4 kg
		²⁴¹ Pu	36,6 kg
		²⁴² Pu	10,6 kg
Gaines	4 MCi		
Réacteur PWR : 1 000 MWé, rendement 32 %, facteur de charge 100 %, taux de combustion 33 000 MW · jour/tonne. <i>total ~ 296 kg</i>			

Le tableau ci-dessous indique l'état de 33 tonnes de combustible irradié après 5 mois de stockage en piscine, c'est-à-dire au moment du transport vers l'usine de retraitement.

	Activité	Principaux produits
Produits de fission	130 MCi	Il reste : T, ⁸⁵ Kr, ^{89,90} Sr, ^{129,131} I, ¹³¹ Xe, ^{134,137} Cs et autres
Actinides	4,5 MCi	Disparition des : ²³⁷ U, ²³⁹ U, ²⁴³ Pu, et reste surtout les ²³⁸ Pu à ²⁴² Pu ²⁴¹ Am, ²⁴² Cm
Gaines	1 MCi	
Réacteur PWR : 1 000 MWé, rendement 32 %, facteur de charge 100 %, taux de combustion 33 000 MW·jour/tonne, combustible sorti du réacteur depuis 5 mois.		

2. Retraitement des combustibles irradiés

On constate que l'usine de retraitement aura à manipuler des quantités très importantes de produits radioactifs, malgré le repos pendant 5 mois en piscine, auprès du réacteur, des combustibles irradiés. L'usine de retraitement a pour fonction de :

- recupérer du combustible irradié le plutonium et l'uranium appauvri (mais dont la teneur en ²³⁵U est supérieure à la teneur naturelle),
- conditionner les produits de fission de manière à les stocker « commodément ».

A cette fin, il est procédé aux opérations suivantes :

- dégainage en piscine (mécaniquement ou par attaque à l'acide nitrique),
- dissolution dans l'acide nitrique concentré, au cours de laquelle on forme des sels avec relâchement des produits gazeux (notamment ⁸⁵Kr, ¹³¹I),
- séparation chimique des nitrates d'uranium et de plutonium à l'aide d'un solvant organique (le phosphate tributylque),
- séparation de l'uranium du plutonium par réduction de ce dernier. Le plutonium est ensuite purifié sous forme métallique ou d'oxyde. L'uranium appauvri est renvoyé en début du cycle du combustible.

Après la séparation de l'uranium et du plutonium, il demeure environ 15 m³ de solutions aqueuses comprenant l'ensemble des produits de fission solubles, et une faible partie d'actinides non séparées, environ 0,1 à 0,5 % suivant le nombre de cycles de décontamination auquel il a été procédé dans la phase c ci-dessus.

Actuellement, ces solutions aqueuses de très haute activité (~ 10⁶ à 10⁷ Ci/m³) sont gardées dans des cuves en acier inox, à double paroi, elles-mêmes situées dans des casemates en béton. Ces solutions doivent être perpétuellement agitées et refroidies en raison du fort dégagement de chaleur dû à la radioactivité (environ 200 kW/m³ après 10 ans de stockage). En raison de l'accroissement très rapide des volumes à stocker (il est prévu 550 m³ en 1985, 2 100 m³ en 2000) et des problèmes que posent leur surveillance, il est envisagé par le CEA de traiter ces produits de fission (~ 10³ Ci/litre) en les vitrifiant après au moins 5 ans de stockage dans ces cuves. Ces verres seraient ensuite stockés dans des puits de béton refroidis par air. Au bout de 800 ans, l'activité des produits de fission serait redevenue « tolérable ».

Le procédé de vitrification devrait être au point en 1977 à Marcoule. Il est prévu que d'ici une dizaine d'années le stock existant de déchets soit résorbé (*Revue générale nucléaire*, décembre 1976). Or, les déchets existant actuellement proviennent de réacteurs graphite-gaz et sont beaucoup plus faciles à traiter que les déchets de réacteurs PWR. De plus, le stock actuel est très petit comparé aux quantités prochainement produites par les premiers réacteurs du programme électronucléaire. Autant dire que la vitrification des déchets va prendre de plus en plus de retard par rapport aux besoins.

3. Déchets des différentes filières de réacteurs

Le tableau p. 40 donne les masses et les activités des déchets radioactifs des différents types de réacteurs.

On remarquera, sur ce tableau, que l'activité des produits de fission et des actinides (ou transuraniens) par tonne de combustible est 3 à 4 fois plus importante pour les déchets des PWR que pour ceux des graphite-gaz, et 12 à 15 fois plus importante pour les déchets des surgénérateurs.

L'activité des actinides indiquée dans ce tableau est l'activité *résiduelle* présente dans les déchets après séparation. Ces déchets contiennent la totalité de l'américium et du curium et une faible fraction d'uranium et de plutonium (0,5 %) en plus de la quasi-totalité des produits de fission (99,9 %).

DÉCHETS RADIOACTIFS DES DIFFÉRENTES FILIÈRES DE RÉACTEURS*				
(on suppose un taux de charge annuel de 80 %)				
Filières		Réacteur graphite-gaz	Réacteur PWR	Surgénérateur à neutrons rapides
Taux moyen de combustion en MW × jour/t		4 000	33 000	80 000
Produits de fission	Masse en g/t	4 160	35 000	85 000
	Activité en Ci/t	$1,4 \cdot 10^6$	$4,5 \cdot 10^6$	$18 \cdot 10^6$
Actinides	Masses en g/t U			
		$995 \cdot 10^3$	$995 \cdot 10^3$	$719 \cdot 10^3$
	Np	22	760	180
	Pu	2 600	9 100	194 000
	Am	4	150	2 300
	Cu	—	35	80
Activité en Ci/t**		5 000	21 000	70 000

* Les activités indiquées sont les activités 150 jours après la sortie du réacteur.
** Après récupération du U et du Pu à 99,5 %.

4. Problèmes spécifiques du retraitement

Le maniement des déchets pose des problèmes considérables par rapport à l'environnement. On peut les citer dans l'ordre :

1. *Rejets de krypton 85 ou de tritium* : au cours de la dissolution du combustible, il y a rejet total de tous les gaz rares radioactifs. Le ^{85}Kr , en raison de sa période (10,8 ans) et de sa quantité (383 000 Ci/ 1 000 MWé/an), pose un problème à long terme. En effet, en 1990, compte tenu des programmes existants, on prévoit $7,4 \times 10^7$ Ci de ^{85}Kr , accumulé essentiellement dans l'atmosphère entre les 30° et 50° parallèles de l'hémisphère Nord. Notamment, si le ^{85}Kr rejeté par La Hague se répartissait sur la seule France, on atteindrait à cette date la CMA. Il faut signaler également le danger de concentration de ^{85}Kr au niveau des usages industriels (air liquide, lampes à krypton) et les conséquences pour les personnels de ces usines. Or, actuellement, il n'est pas prévu de système de rétention de ^{85}Kr à La Hague. En ce qui concerne le tritium, la majorité de celui-ci sera rejetée sous forme liquide malgré l'ignorance dans laquelle on est des processus possibles de reconcentration de cet élément dans des molécules organiques comme les acides aminés. Sous forme de vapeur, environ 24 000 Ci de tritium seront rejetés par la cheminée, ce qui est très supérieur aux rejets d'une centrale.

2. *Séparation complète des actinides et des produits de fission* : l'usine de retraitement servant d'abord à récupérer le Pu, il n'est pas essentiel du point de vue de la rentabilité, peut-être même négatif, de séparer les actinides des produits de fission au-delà d'un certain seuil. La proportion d'actinides restant mélangés aux produits de fission prévue par les plus optimistes est de 10^{-3} . Cette proportion doit pouvoir être ramenée à 10^{-4} ou 10^{-5} selon leur type, pour que l'on se contente de trouver un moyen efficace à leur stockage durant 800 ans seulement ! Cela est dû aux très longues périodes des actinides. Une séparation chimique aussi poussée n'est pas prévue actuellement en France.

3. *Stockage à long terme des déchets* : la solution envisagée (la vitrification, à partir de 1977) en vue du stockage sur 800 ans des déchets pose les problèmes suivants : évolution des propriétés des verres sur une telle échelle de temps (influence des rayonnements, diffusion des noyaux radioactifs vers l'extérieur), stabilité des structures géologiques, efficacité du confinement à l'intérieur de ces structures. Il s'agit d'un véritable pari sur l'avenir.

4. *Production du plutonium* : 300 kg de Pu (tableau p. 38-39) sont produits par 1 000 MWé, soit 15 tonnes en 1985 si le programme français se réalise. On constate qu'environ 1 % de ce Pu n'est pas récupéré à l'usine de retraitement (contamination de composants et de circuits de traitement, perte dans les déchets « produits de fission »). Cette situation empirera avec le développement des ateliers de combustibles à Pu, et posera alors un grave problème lors du démantèlement de l'usine de retraitement.

5. Données économiques

Les divers centres de retraitement existants ou en projets sont donnés au tableau ci-dessous. Les signes ? indiquent que les décisions, ou les dates de mises en service, ne sont pas sûres.

Nom	Pays	En fonctionnement	Date de mise en service	Capacité (t/an)
AGNS	USA	non	1976-1977	1 500
NFS	USA	non	1979?	750
General Electric	USA	non	1980?	300-500
EXXON	USA	non	1985?	1 500
Windscale	GB	non	Arrêté en 1973	400
BNFL	GB	non	1982?	800
KEWA	RFA	non	1983?	1 400
	Belgique	non	1980?	300
	Espagne	non	1985?	?
	Suède	non	1985-1987?	?
La Hague	France	oui	1975	100
La Hague	France	non	1980	800
La Hague	France	non	1985-1986?	1 500
Marcoule	France	oui	1958	200

Ce tableau traduit de larges réticences (à l'exclusion peut-être de la France) à construire de telles usines, pour diverses raisons. D'abord, il faut souligner la complexité du retraitement des combustibles irradiés, qui aboutit à ce qu'à la fin de 1974 toutes les usines de retraitement des combustibles de PWR et BWR étaient arrêtées, en raison de difficultés techniques, de coûts élevés et aussi en raison du renforcement des règles de sécurité (aux États-Unis notamment). Il y a ensuite le fait que l'usine de retraitement a pour but n° 1 de récupérer le plutonium en vue soit de l'armement atomique, soit du développement des surgénérateurs. On comprend plus aisément pourquoi la France est pilote dans ce domaine, si on compare sa stratégie énergétique à celle d'autres pays comme les États-Unis ou la Grande-Bretagne. On constate également que, si les programmes électronucléaires se développent comme prévu, il faudrait une nouvelle usine de 1 500 t/an pour 50 000 MW_e nouvellement installés. On ne peut donc s'attendre qu'à une accumulation de plus en plus importante des combustibles irradiés de par le monde, compte tenu des projets de construction figurant au tableau ci-dessus.

8. Le plutonium, problèmes biologiques et médicaux

1. Propriétés chimique et physique

Plutonium 239 : émetteur α , période 24 360 ans
énergies 5,11 MeV
5,16 MeV

Plutonium 238 : émetteur α , période 89 ans

Plutonium 241 : émetteur β , période 13 ans

Plutonium 240 et 242 : propriétés voisines de Plutonium 239.

Le bioxyde de Plutonium (PuO_2) constitue le composé le plus important. Les réactions de PuO_2 en milieu biologique varient énormément en fonction de sa composition chimique exacte, de la taille et de la forme des particules.

2. Histoire de la recherche biologique et médicale

Les premières études remontent à 1944. On a découvert que :

a. Le plutonium injecté dans le sang se dépose principalement dans les os et dans le foie,

b. Le plutonium administré par voie orale est très faiblement absorbé,

c. Le plutonium introduit par la trachée reste très longtemps dans les poumons.

Le corps humain l'évacue très lentement.

A long terme, un dépôt de plutonium provoque un ostéosarcome. En 1952, à l'université de l'Utah, des recherches sont faites avec du plutonium injecté à des chiens Beagle.

En 1960, ces recherches sont étendues* à d'autres animaux.

Après 1970, des recherches sont faites sur des chiens Beagle soumis à des aérosols de PuO_2 . Actuellement, des recherches sont faites sur la contamination des plaies.

* Il y eu aussi [des cobayes humains du plutonium](#)

3. Voies de pénétration du plutonium chez l'homme

1. *Pénétration directe* : chez l'homme, la voie de pénétration la plus vraisemblable d'une quantité importante de plutonium est l'inhalation. Le plutonium, capable d'atteindre les régions alvéolaires du poumon, peut être retenu en grande quantité dans le poumon ou redistribué dans le corps par l'organisme.

2. *Contamination par l'environnement* : l'absorption du plutonium du sol à travers le système racinaire des plantes est très limitée (rapport des concentrations plante/sol de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-6}). Si l'on mange la plante, moins de 10^{-4} du plutonium est absorbé par voie intestinale.

L'environnement nous contaminera plus par des moyens physiques que biologiques. L'existence de tant de variables complexes du plutonium, par des moyens physiques de redistribution dans la nature, semble défier toute évaluation. Ainsi, des lapins vivant dans la zone d'expérimentation du Nevada ont accumulé dans leurs os des quantités de plutonium équivalant à 0,005 à 0,5 fois la quantité de plutonium contenue dans un gramme du sol sur lequel ils demeurent.

Actuellement, par suite des essais d'armes nucléaires, on estime avoir réparti 0,3 à 0,5 millions de curies de plutonium uniformément sur le globe terrestre. De 1965 à 1966, l'analyse de tissus humains de différentes régions du monde donne 2 picocuries pour le corps humain. D'après ces chiffres, on estime qu'un individu accumule environ 10^{-17} de la quantité totale de plutonium présent dans l'environnement. Cependant, les informations actuelles sont trop fragmentaires et ne permettent pas de prévoir l'accumulation probable du plutonium dans le corps humain.

4. Répartition du plutonium dans le corps humain

Le plutonium reste longtemps dans le corps. Des expériences sur des chiens Beagle exposés à du PuO_2 inhalé en aérosol ont montré que 80 % du plutonium déposé dans les alvéoles pulmonaires demeuraient encore 10 ans après l'exposition. Ce plutonium était réparti de la façon suivante :

- 10 % dans les poumons,
- 40 % dans les ganglions lymphatiques thoraciques,
- 15 % dans le foie,
- 5 % dans les ganglions lymphatiques abdominaux,
- 5 % dans les os (à la surface des os).

Ce sont les ganglions lymphatiques les plus touchés. Dans le foie, la période de rétention du plutonium est de 40 ans.

Dans le sang, le plutonium s'associe à la transférine pour former un complexe extrêmement stable.

5. Effets biologiques

La très forte toxicité du plutonium injecté provient principalement de ses effets destructeurs sur le système hématopoïétique. Ceci est dû à l'irradiation de la moelle des os par le plutonium déposé à la surface de l'os. D'après les calculs de la CIPR, le plus grand danger du plutonium est son « facteur de distribution non uniforme » de 5.

A partir d'expériences sur le chien Beagle, on peut conclure qu'une dose supérieure à 1 nanocurie par gramme provoquerait la mort prématurée due à une tumeur du poumon. En conclusion, l'inhalation du plutonium insoluble provoquera certainement des tumeurs du poumon, l'inhalation du plutonium soluble produira à la fois des tumeurs du poumon et des os.

6. Évaluation des dangers et limites d'exposition

La charge admissible de plutonium était fixée à 300 nCi en 1944. En 1949, elle a été fixée à 40 nCi. Cette limite est fixée à partir des effets comparés du plutonium et du radium sur l'os. Elle ne serait plus valable si l'organe « critique » n'était plus l'os. Le poumon donnerait une limite de 16 nCi, les ganglions lymphatiques une limite encore plus sévère. Mais cette limite n'est pas appliquée, sous prétexte que les ganglions lymphatiques ne constituent pas un tissu « critique ». Le foie donnerait une limite plus élevée (50 à 200 nCi).

W. J. Bair et R. C. Thompson, membres de la CIPR, estiment en conclusion que, dans les prochaines années, les limites d'exposition seront abaissées.

Référence

W. J. Bair, R. C. Thompson, *Science*, 183, 1974, p. 715-722.

9. Contamination biologique par le plutonium

Une étude menée au Batelle Institute a permis d'apporter des précisions sur les phénomènes de reconcentration biologique du plutonium dans l'environnement. Les valeurs précédemment admises du rapport de concentration plante/sol sont de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-6} ¹, mais ces valeurs ont été obtenues dans des conditions expérimentales particulières. En effet, on a dû longtemps travailler avec des concentrations de Pu dans le sol, suffisamment élevées pour être mesurables par les techniques disponibles. Les auteurs du rapport du Batelle Institute ² ont amélioré ces techniques et ont montré que le facteur de concentration augmentait avec la diminution du Pu dans le sol. Ce facteur de concentration est multiplié par 10 quand la concentration du Pu dans le sol passe de 10 $\mu\text{Ci/g}$ de sol à 0,05 $\mu\text{Ci/g}$.

1. On pense que les fortes concentrations de Pu dans le sol peuvent conduire soit à des lésions de la racine, soit à la perturbation du mécanisme d'absorption de la racine, soit à une atteinte de la microflore du sol qui participe à la solubilisation du Pu; de plus, la concentration dans la racine est 3 à 8 fois plus importante que dans les parties aériennes de la plante. Par conséquent, il faut mesurer l'incorporation du Pu dans les plantes en particulier au niveau de la racine quand c'est la partie consommée (radis, carottes).

Pour avoir une évaluation satisfaisante du taux de concentration du Pu dans les plantes, il faut se placer dans des conditions expérimentales proches de la réalité. En outre, la décomposition des racines dans le sol permet la redistribution du Pu dans le sol, alors que l'on considérerait qu'il était immobile; cette contamination favorise aussi l'augmentation de l'incorporation du Pu dans le sol lors de cultures successives (fait connu ³ mais non expliqué jusqu'à maintenant).

2. Une étude américaine récente ⁴ montre que la surveillance atmosphérique ne suffit pas pour apprécier la contamination par le Pu. En effet, les auteurs considèrent que le Pu contenu dans la fraction de sol qui est sous forme de poussière peut être inhalé et représente un risque potentiel négligé par la dosimétrie du Pu dans l'air. Les facteurs de resuspension, humidité du sol, vitesse du vent, mobilisation mécanique (labourage, circulation automobile, chantiers de construction) sont à prendre en considération, mais sont encore insuffisants pour apprécier tous les risques possibles. Il faut, en effet, prendre en compte d'autres données pour une plus complète évaluation des risques

- l'introduction dans les maisons de la poussière véhiculée par les animaux domestiques, les chaussures, les vêtements (dans l'industrie de l'amiante, rappelons que des femmes de travailleurs ont contracté des cancers pulmonaires après avoir manipulé les vêtements contaminés. A Seveso, pour éviter l'extension des contaminations par la dioxine, on a dû abattre les animaux).

- l'ingestion par les enfants d'aliments souillés de terre (il existe des exemples d'empoisonnement au plomb selon cette voie).

Tout ce qui précède souligne que les progrès en radiobiologie amènent à la conclusion que les risques de contamination radioactive n'obéissent pas à des lois simples. Les mécanismes complexes mis en cause nous amènent souvent à conclure que les risques sont sous-estimés. Cela devrait conduire au moins à un abaissement des CMA ⁵ et, en l'état des recherches, à conclure que l'on doit tendre vers une situation sans aucun rejet.

Car il est une fois de plus clair que les mesures de radioactivité, aussi sensibles que soient actuellement les techniques, sont insuffisantes pour apprécier [la contamination réelle de l'environnement et des individus](#). Il n'est pas tenu compte des facteurs de dispersion et des concentrations biologiques qui concourent à l'extension du risque et à son aggravation dès que le radionucléide est engagé dans l'environnement.

Références

1. Voir annexe 8.

2. R. E. Wildung et T. R. Garland, *Agricultural and Food Chemist*, 22, 1974, p. 836.

3. E. M. Rommey, H. M. Morte, K. H. Larson, *Heath Phys.*, 19, 1970, p. 487.

4. C. J. Johnson, R. R. Tidball et R. C. Severson, *Science*, 193, 1976, p. 488.

5. M. C. Thorne et J. Vennart, *Nature*, 263, 1976, p. 555.

10. Technique de réfrigération des centrales nucléaires

Les turbines actionnées par les réacteurs nucléaires ont besoin, comme toute machine thermique, d'une « source froide » au contact de laquelle la vapeur produite dans le réacteur se condense (cf. annexes 1 et 2). Il s'agit là d'un principe fondamental de la physique (le second principe de la thermodynamique) qu'aucune astuce technique ne peut abolir. Dans le cas des réacteurs nucléaires, et vu leur température de fonctionnement, cela implique que les 2/3 des calories produites dans le réacteur sont évacuées par la source froide, soit un rendement de production électrique de 33 % ; dans le cas des centrales thermiques classiques, le rendement peut atteindre 45 %.

Si l'on considère une centrale EDF type, soit 4 réacteurs de 1 gigawatt (électrique), cela signifie que la source froide doit évacuer 8 gigawatts thermiques, soit approximativement 2 milliards de calories par seconde. Le fluide utilisé comme source froide des turbines est en général de l'eau ; sachant qu'une calorie élève d'un degré la température d'un gramme d'eau, on voit qu'en tolérant un réchauffement de 10 °C de l'eau du circuit de refroidissement il faut assurer dans ce circuit un débit de 200 m³/s. A partir de ces quelques chiffres, on peut envisager plusieurs techniques de refroidissement des centrales nucléaires.

1. Eau : circuit ouvert

Là où l'eau est abondante (bord de mer, fleuves à grand débit) le constructeur pompera 200 m³/s dans cette réserve froide naturelle. Cette eau passe dans les condenseurs des turbines où elle est réchauffée de 10 °C, puis est rejetée dans le milieu où elle a été pompée (figure 1). Ce système a l'avantage de la simplicité technique, d'où la prolifération des sites nucléaires sur les côtes, ou le long des fleuves. Signalons néanmoins qu'un débit de 200 m³/s représente à peu près le débit de la Seine à Paris... Voir annexes 11 et 12 pour l'impact écologique.

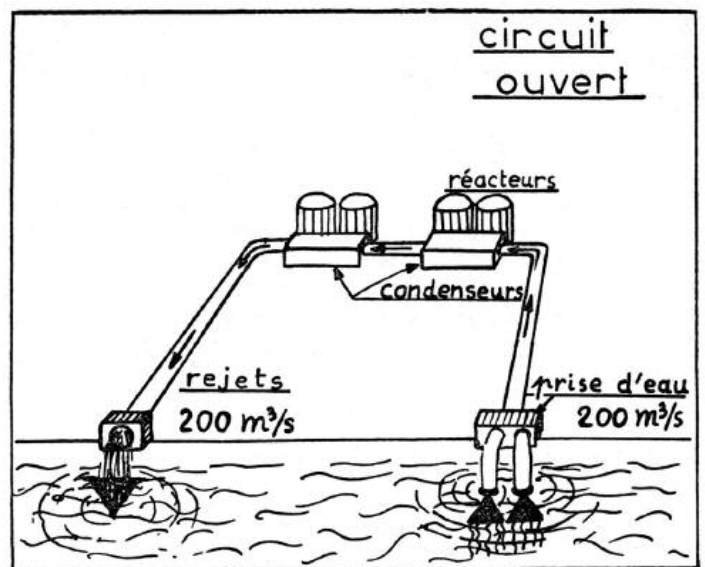


FIGURE 1

2. Eau : circuit à recyclage (tours humides)

Là où l'eau est plus rare, on peut envisager un système mixte air-eau, improprement appelé « circuit fermé » dans les brochures EDF ou CEA (en fait il y a un recyclage à 90 %) ; voir figure 2. Dans ce système, l'eau réchauffée dans les condenseurs est refroidie dans de grandes tours (environ 150 m de haut) où l'eau ruisselle dans un puissant courant d'air ascendant qui finalement emporte les calories dans l'atmosphère ; l'eau ainsi rafraîchie est recyclée dans les condenseurs. Il y a néanmoins rejet d'eau chaude et perte par évaporation ; pour la centrale type de 4 GWé, cela représente respectivement environ 10 m³/s et 2 m³/s ; il est donc indispensable d'avoir un pompage de 12 m³/s. Voir annexe 11 pour l'impact écologique de ce système. Signalons notamment le panache de vapeur humide soufflé par la tour.

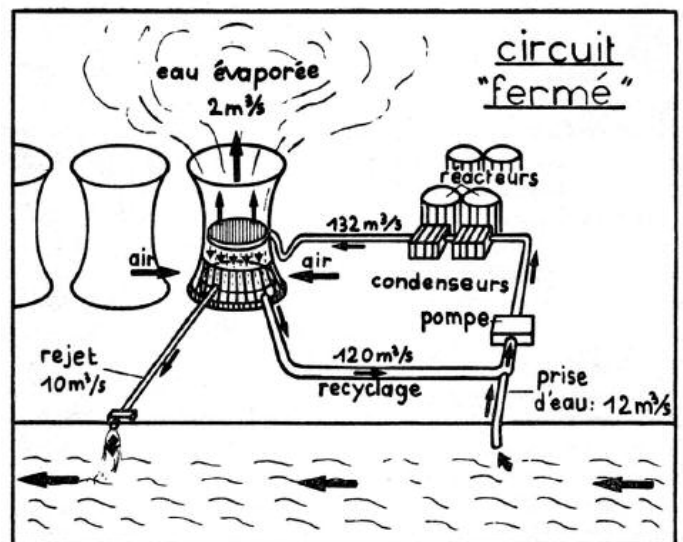


FIGURE 2

3. Aérocondenseurs: tours sèches

On peut également envisager un circuit totalement fermé, dans lequel, au niveau des tours, le fluide de refroidissement circule dans un grand échangeur de température qui évite le contact direct avec l'air donc l'évaporation dans l'air soufflé, d'où le terme « tour sèche ». Il s'agit là d'un système analogue aux radiateurs des voitures. La presse a fait grand cas de ce système fin 1976 suite à un rapport de Creusot-Loire¹ préconisant ce système de refroidissement ; la figure 3 donne une vue perspective d'une centrale type refroidie par tour sèche (vue empruntée à ce document).

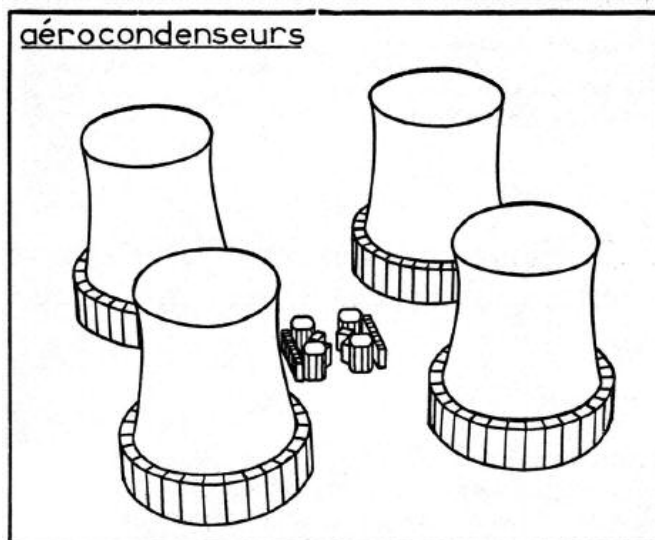


FIGURE 3

Les trois figures qui précèdent permettent de voir le vrai défaut des centrales nucléaires EDF en matière de refroidissement : leur gigantisme. Dans le cas 1 (circuit ouvert), on pompe et rejette un vrai

fleuve de 200 m³/s dans des tuyaux gros comme un tunnel de métro ; dans le cas 2, on pompe moins d'eau, mais l'on doit construire plusieurs tours de 150 m de haut environ crachant un large panache de brouillard sur la contrée ; dans le cas 3, qui était recommandé par Creusot-Loire pour des régions sèches comme la Champagne crayeuse, on devra construire des tours à côté desquelles les réacteurs auront l'air bien petits (figure 3) et la cathédrale de Reims paraîtra un modeste oratoire... Telles sont les cathédrales de l'an 2000.

Référence

1. *Pour une stratégie d'implantation des centrales nucléoélectriques*, rapport de Creusot-Loire (division Batignolles), 1976. Rediffusé en janvier 1977 par la Fédération française des sociétés de protection de la nature, 57, rue Cuvier, Paris 5^e.

11. Besoins en eau des centrales nucléaires et possibilités des fleuves en France

1. Rappels

Toutes les machines thermiques doivent évacuer des calories et ce, d'autant plus que leur rendement de Carnot est moins bon :

- rendement des centrales nucléaires (graphite-gaz ou PWR) : ~ 35 %,
- rendement des centrales fuel : ~ 45 à 50 %.

Les centrales à fuel rejettent 1 000 kcal au fleuve et 250 kcal à la cheminée par kWh produit. Les réacteurs nucléaires rejettent 1 650 kcal par kWh dans l'eau de la source froide du condenseur. La technologie nucléaire nécessite de regrouper plusieurs réacteurs (2 ou 4) dans la même centrale. La puissance thermique à évacuer localement est donc beaucoup plus importante pour une centrale nucléaire que pour une centrale classique.

2. Circuits de refroidissement

1. *Circuit ouvert* : pour 1 000 MWé, il faut disposer d'un débit de 45 à 50 m³/s pour une température ajoutée au condenseur de 10 °C. Comme les Agences de bassin s'efforcent d'obtenir d'EDF que la moitié du débit de la rivière reste disponible, il faut donc un fleuve dont le débit ne descende pas en dessous de 90 à 100 m³/s. Seuls le Rhin et le Rhône peuvent être envisagés. C'est pourquoi EDF prévoit des installations en circuit ouvert sur la mer : l'unité type serait un parc de 4 tranches (environ 4 x 1 200 MWé) nécessitant un débit d'eau de mer pompée et rejetée de 200 à 250 m³/s (débit moyen de la Seine à Paris).

2. *Circuit avec réfrigérant humide* : pour 1 000 MWé, il faut un circuit de 33 m³/s au condenseur. Suivant son type, la température ajoutée est de 10 à 15 °C. L'eau réchauffée transite dans une tour de 150 à 170 m de haut et de 120 à 150 m de diamètre à la base. Une fraction, 0,5 m³/s, est perdue alors par évaporation

ou primage (transport aérien de gouttelettes). Par ailleurs, pour éviter l'accumulation de sels dissous dans le circuit primaire, on pompe dans la rivière et 3 m³/s sont restitués, réchauffés de 10 à 15 °C en aval de la centrale (pour 1 000 MWé).

3. *Circuit avec réfrigérant sec* : cette solution est encore à l'étude et n'est pas envisagée pour le moment par EDF.

3. Quelques exemples

1. Seine, Nogentais :

- 4 tranches de 1 000 MWé avec tour,
- pompage 16 m³/s,
- rejet 12 m³/s élevés de 15 °C.

Or, le débit de la Seine à l'étiage est, dans le Nogentais, de 12 m³/s. Il faut donc prévoir des réservoirs qui devront assurer toute l'année un débit supérieur à 32 m³/s, soit la construction d'un lac artificiel de 10 000 ha sur 2 m de profondeur (200 à 260 millions de m³).

2. Loire, Dampierre :

- 4 tranches de 1 000 MWé avec tour.

On évaporera dans les tours 1/20 du débit moyen de la Loire (320 m³/s). A l'étiage, on peut descendre à 1/10.

3. *Rhône* : actuellement déjà très sollicité, il est soumis à un prélèvement de 7.10⁹ m³/an sur un débit de 49.10⁹ m³/an. Si on prend en considération tous les sites nucléaires envisagés par les projets actuels, cela revient à transformer entre 5 et 20 % de son débit en vapeur d'eau. Or, ceci ne peut être envisagé compte tenu des périodes d'étiage.

4. Eau évaporée (en millions de m³/an)

L'agriculture utilise actuellement pour ses besoins d'irrigation 300 millions de m³ par an.

	1973	1985	2000
Centrale classique	100	70	45
Centrale nucléaire	10	150	330
Diverses autres sources d'énergie	0	0	45
<i>Total</i>	110	220	420
Agriculture	300	?	?

5. Conclusion

En période de sécheresse, les centrales hydrauliques ne peuvent fonctionner à pleine puissance. Pour répondre à la demande d'électricité, il faut donc faire appel à d'autres installations. Dans la situation actuelle, les centrales à fuel ne peuvent pas non plus donner satisfaction par suite des débits insuffisants des fleuves pour les réfrigérer. Un équipement en centrales nucléaires sur les fleuves ne peut qu'empirer les problèmes par suite de leur puissance plus élevée et de leur rendement inférieur.

Références

- F. Ramade, *Le Développement de l'industrie nucléaire et ses conséquences écologiques*, FFSPN, 57, rue Cuvier, Paris 5^e.
M. Brosselin, *Conséquences du rejet des eaux de refroidissement des centrales nucléaires*, FFSPN, n° 2, juin 1975.

12. Impact des rejets d'eaux chaudes en milieu marin

A l'inverse des centrales nucléaires refroidies en circuit ouvert ou fermé sur les fleuves, les centrales placées en bord de mer semblent, même en période de sécheresse, pouvoir travailler à plein rendement. C'est ignorer que les conséquences sur l'environnement marin sont quasi inconnues et qu'il est donc impossible de lancer un programme d'envergure sans études et résultats préalables.

1. *Effets mécaniques* : l'importance du prélèvement (200 à 250 m³/s pour 4 tranches de 1 000 MWé) se traduira par le pompage et le rejet d'une quantité d'eau équivalente au débit moyen de la Seine à Paris et exigera l'implantation d'énormes tuyaux (diamètre d'un tunnel du métro) assez loin en mer (1 000 à 1 500 m), soit pour pomper de l'eau froide (Méditerranée), soit pour tenir compte des marées.

Or, la courantologie, l'érosion et la sédimentation littorales sont des sciences où tout reste à découvrir. Les modèles mathématiques, pour être valables, doivent reposer sur des prises de données qui ne sont même pas amorcées pour la plupart des sites. L'implantation de ces fleuves artificiels va introduire des modifications des fonds marins côtiers : bouleversement des populations biologiques et des cycles de reproduction, remise en suspension des vases gênant le développement des espèces qui ne supportent pas les eaux troubles. De plus, au niveau de la prise d'eau, les êtres marins seront aspirés et subiront les chocs contre les grilles et autres dispositifs d'arrêt. Pour quelques centrales américaines Clark et Brownell indiquent les pourcentages suivants de poissons morts :

- 1,3 % pour des poissons de 1 mm de long
- 11 % pour des poissons de 40 mm de long
- 55 % pour des poissons de 50 mm de long
- 86 % pour des poissons de 63 mm de long
- 100 % pour les poissons de plus de 80 mm de long.

La mortalité est très variable suivant les lieux et le moment de l'année. Il est donc difficile de savoir comment planter correctement la prise d'eau pour qu'elle fasse le moins de dégâts possibles. Clark écrit que le nombre d'individus tués descend rarement en dessous d'un million par an. Aucune étude française n'existe sur ce problème, bien qu'il soit très grave car il se traduit par un amenuisement progressif des espèces.

2. *Effets thermiques* : le mélange des eaux froides et chaudes s'effectue avec d'autant plus de difficultés que l'écart thermique est plus grand (densité et viscosité éloignées), on a alors formation de courants et de tourbillons.

Par modèle mathématique, on a essayé d'avoir une estimation des zones chaudes.

- Agence de bassin Seine-Normandie (500 MWé) :

Température ajoutée

1 à 2 km ²	3 à 7 °C
2 à 7 km ²	1 à 3 °C
7 à 25 km ²	0,5 à 1 °C.

- EDF (400 MWé) :

1 km ²	3 à 11 °C
9 km ²	1 à 3 °C
16 km ²	0,1 à 1 °C.

D'une manière générale, les alevins sont plus sensibles que les organismes planctoniques. Le zooplankton, qui se régénère moins vite, est plus sensible que le phytoplancton.

L'échauffement des eaux, outre qu'il diminue leur teneur en oxygène, a l'effet antagoniste d'augmenter la demande de ce gaz de la part des êtres vivants : au voisinage de 20 °C, chaque degré d'échauffement augmente de 10 % la demande en oxygène.

L'accélération des réactions biochimiques n'a pas que des aspects négatifs : on peut substituer une espèce à une autre. On pourrait réaliser des élevages plus rapides, par exemple pour obtenir des crevettes roses en 14 mois au lieu de 2 à 3 ans. Ce sont des possibilités qui posent d'autres problèmes, car il ne sert à rien de savoir que les huîtres et les moules résistent au choc thermique si leur nourriture est détruite.

Enfin, en milieu aquatique peu renouvelé et mal oxygéné, des pollutions microbiennes et virales à tendance anaérobie et thermophile peuvent être favorisées, elles sont généralement pathogènes pour l'homme.

3. *Effets chimiques* : pour lutter contre la prolifération des organismes tels que les moules qui ont tendance à se fixer dans les tuyaux, on pense pour le moment utiliser du chlore : pour 1 000 MWé en circuit ouvert, cela représente, à la dose de 0,7 partie pour mille, 3 tonnes en 24 heures. Il est aussi vraisemblable que le chlore sera produit sur place par électrolyse, ce qui provoquera, dans l'état actuel des techniques, une pollution mercurielle additionnelle fort préoccupante.

Conclusion

En milieu marin, les connaissances sont très fragmentaires. Un certain nombre d'études vient d'être confié

à des laboratoires, mais le facteur durée est indispensable. Dans bien des secteurs, la systématique des espèces n'a jamais été faite, on ne connaît pas les enchaînements. La surveillance des chaînes alimentaires sur le plan de la contamination par les radionucléides restera donc théorique encore longtemps. On pourrait songer à des tours de refroidissement en bord de mer pour limiter les effets, mais l'expérience anglaise n'est guère encourageante : 20 000 ha ont été transformés en lande halophile (du grec *halo* - sel) par le phénomène de primage (formation de gouttelettes) qui rejette dans l'atmosphère de l'ordre de 1 m³/s d'eau salée. Dans l'état actuel de nos connaissances, il semble donc très prématuré de développer des installations de grande puissance en bord de mer.

Références

Quebec Science, février 1974, revue publiée par l'université du Québec. M. Brosselin, *op. cit.*

13. La pollution radioactive du milieu aquatique et ses conséquences écologiques

1. Sources de radioactivité dans le milieu aquatique

- Plusieurs sources de radioactivité artificielle s'ajoutent à la radioactivité naturelle :
- les explosions nucléaires aériennes et sous-marines ;
 - l'industrie nucléaire : rejets « contrôlés » de polluants radioactifs. Le retraitement des combustibles irradiés est l'étape la plus polluante - probabilité non négligeable d'apparition d'incidents pouvant provoquer une contamination du milieu aquatique ;
 - les laboratoires utilisant des radionucléides augmentent les possibilités de rejets incontrôlés et de fuites dans le milieu ;
 - les navires à propulsion nucléaire sont une source de pollution non négligeable du milieu aquatique.

2. Devenir des radioéléments libérés dans le milieu aquatique

On peut définir trois compartiments dans le milieu aquatique l'eau, les sédiments et les organismes vivants (en surface ou en profondeur). Des échanges continus se produisent à l'intérieur de chaque compartiment et entre ces différents compartiments (figure 1).

1. Eau

Les radionucléides introduits dans l'eau peuvent se trouver sous l'une des formes suivantes : soluble, colloïdale, particulaire. On connaît mal les quantités relatives, la stabilité et les possibilités d'évolution de ces différentes formes physicochimiques des radionucléides et de leurs isotopes stables dans le milieu naturel. Pourtant, ces données conditionnent, pour une part importante, les échanges entre l'eau, les sédiments et les organismes vivants.

2. Sédiments

L'accumulation des radioéléments dans les sédiments peut se faire soit directement à partir de l'eau, soit par précipitation ou sédimentation des

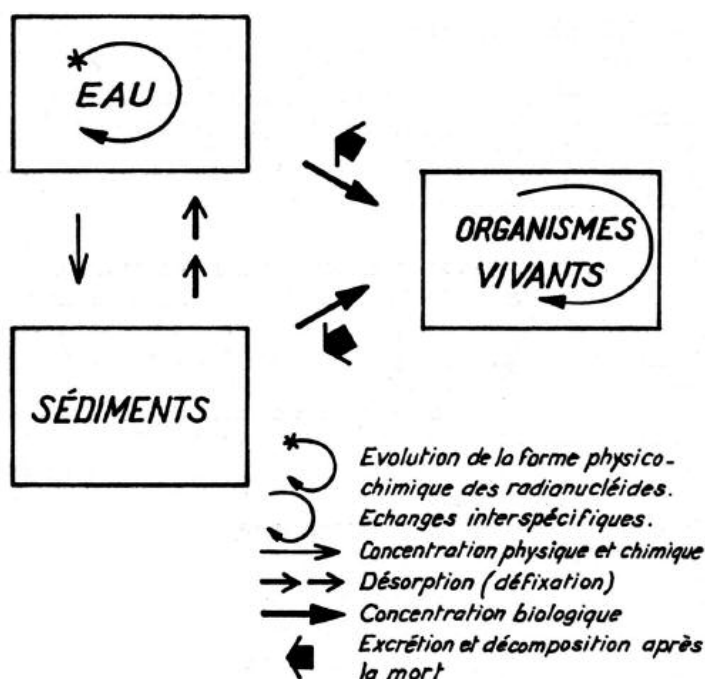


Fig. 1 CYCLE BIOGÉOCHIMIQUE DES RADIONUCLÉIDES

particules radioactives. En général, la matière particulaire naturelle à l'origine des sédiments présente une grande capacité de fixer les radionucléides. Cependant, plusieurs facteurs déterminent le taux d'adsorption des radionucléides sur les sédiments :

- la teneur en matière organique du sédiment facilite la fixation de certains éléments (^{65}Zn , ^{54}Mn , ^{60}Co) et a l'effet inverse pour d'autres (^{137}Cs , ^{32}P des phosphates);
- la taille des particules du sédiment : plus ces particules sont fines, plus elles retiennent de fortes proportions des radionucléides considérés;
- la richesse en argile du sédiment lui confère une plus grande capacité de rétention;
- l'élévation de salinité facilite l'adsorption sur les argiles des éléments sous forme colloïdale, la diminue pour les éléments solubles.

La fixation des radionucléides aux sédiments est réversible et, dans certaines conditions, ils peuvent réapparaître en solution.

3. Organismes vivants

Les organismes vivants peuvent être contaminés par transfert de radionucléides du milieu (eau, sédiment) ou par ingestion de nourriture contaminée. Il peut y avoir simple adsorption à la surface externe de l'organisme ou sur la paroi du tube digestif. Les radionucléides peuvent aussi traverser les membranes biologiques (téguments, branchies, parois du tube digestif) et pénétrer dans différents organes.

A. Transfert eau-organismes.

Le facteur de concentration exprime la capacité d'accumulation des radionucléides par les organismes vivants :

$$FC = \frac{\text{radioactivité de l'organisme par g}}{\text{radioactivité de l'eau par ml}}$$

Par comparaison d'études en laboratoire et de mesures *in situ*, il semble que les organismes accumulent des quantités de radionucléides significativement plus importantes par exposition chronique que par exposition aiguë, surtout pour les éléments qui ont un rôle physiologique (Zn, Mn, Fe, Co).

B. Transfert sédiment-organismes.

D'après les études réalisées en eau douce, en milieu marin, ou en milieu terrestre, les sédiments ou les sols constitueraient de véritables « pièges à contaminants ». Les radionucléides leur seraient associés sous une forme physicochimique non utilisable par les animaux.

C. Relations interspécifiques.

Les organismes végétaux ou animaux peuvent prélever tout radionucléide introduit dans le milieu naturel. Après incorporation à la matière vivante, il y a transfert d'une espèce à l'autre au long des chaînes alimentaires, éventuellement jusqu'à l'homme. Il peut y avoir concentration au cours des différentes étapes (figure 2 A) ou dilution dans le cas d'un simple transfert (figure 2 B).

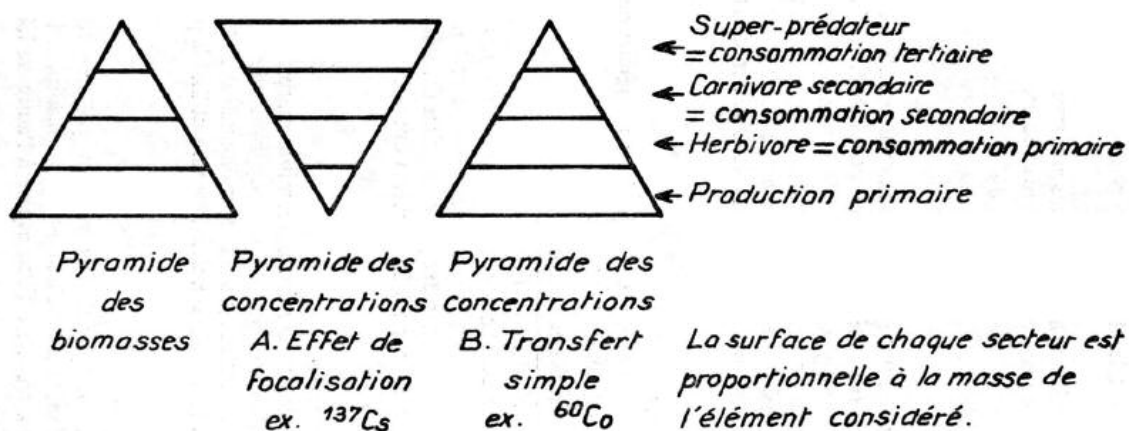


Fig. 2 LES DIFFÉRENTS MODES DE CONTAMINATION DES CHAÎNES ALIMENTAIRES

D. Plusieurs facteurs, dépendant des conditions de l'environnement ou des organismes eux-mêmes, jouent un rôle dans la contamination des organismes.

a. Paramètres écologiques

- Le renouvellement de l'eau au contact des organismes disperse et dilue les polluants ;
- les radionucléides sous forme insoluble sont facilement adsorbés, mais peu assimilés, la contamination restant alors essentiellement limitée au tube digestif ;
- les complexants (EDTA ¹, acide humique, eaux d'égouts) diminuent le plus souvent le prélèvement des éléments par les organismes vivants, ils peuvent aussi en favoriser l'élimination ;
- la compétition isotopique : pour une même concentration de l'isotope radioactif, plus la concentration de l'isotope stable, sous la même forme physicochimique, est forte, moins les organismes accumulent de radioisotopes ;
- la compétition chimique entre éléments différents, de propriétés chimiques voisines (césium et potassium, strontium et calcium) a des conséquences identiques ;
- les facteurs de concentration sont plus élevés dans les eaux douces que dans les eaux marines ;
- la température augmente la contamination plus ou moins efficacement selon les espèces et les radionucléides ;
- la nature de la nourriture disponible, et par suite assimilée, peut faire varier de 1 à 10 la dose de radioactivité.

b. Paramètres dépendant des organismes

- Plus la surface est grande pour un volume donné, plus l'adsorption est élevée (bactéries, plancton, branchies) ;
- les individus les plus jeunes sont presque toujours les plus contaminés ;
- il existe peu d'études de la contamination en fonction de la maturité sexuelle ; un exemple montre qu'elle augmente en période de reproduction chez un ver marin ;
- le rythme des repas : l'apparition des périodes de jeûne tend à minimiser la contamination radioactive ;
- ces périodes, fréquentes au moment de la mue, jouent en sens inverse de la perméabilité plus grande du tégument mou par rapport à la carapace calcifiée ;
- le degré de décomposition de la nourriture dans le tube digestif régule la quantité de radionucléides retenus par l'organisme.

E. Influence des organismes vivants sur le cycle des radionucléides dans le milieu aquatique.

Le transit des radionucléides dans les organismes peut entraîner une modification de leur forme physicochimique. Après la mort des animaux contaminés, leur décomposition libère les radionucléides sous différentes formes. Les migrations effectuées par de nombreux organismes sont à l'origine d'une dispersion des polluants, soit au cours de transports horizontaux sur de grandes distances, soit au cours de migrations verticales pouvant atteindre en profondeur quelques milliers de mètres.

1. Acide utilisé pour décontaminer certains matériaux des installations nucléaires et, en conséquence, fréquemment associé aux effluents liquides.

3. Conséquences des pollutions nucléaires

Les espèces les plus exposées aux risques d'irradiation seront d'une part celles qui accumulent des quantités importantes de radionucléides à partir de l'eau ou de la nourriture, d'autre part celles dont l'habitat présente une contamination élevée. Les organismes aquatiques sont, en général, moins radiosensibles que les mammifères et l'homme. Néanmoins, on a mis en évidence, dans certains cas, des effets somatiques (sur l'individu irradié) : mort, anomalies du développement embryonnaire et de la croissance, aberrations chromosomiques, ralentissement du rythme des divisions cellulaires ; ou des effets génétiques (sur la descendance de l'individu irradié) : mortalité, anomalies du développement. Cependant, ces effets ont été provoqués par des doses expérimentales bien plus élevées que celles qui contaminent le milieu naturel. En général, les effets de l'irradiation sont modérés lorsque les conditions sont par ailleurs optimales, mais des conditions défavorables peuvent augmenter les dommages dus à l'irradiation d'un organisme déjà perturbé.

Conclusion

Il est nécessaire de poursuivre les recherches dans les domaines suivants : transfert du tritium et des

transuraniens de l'eau aux organismes, physicochimie des radionucléides et de leurs isotopes stables dans le milieu naturel, transfert des polluants radioactifs par voie alimentaire. Effets sur les organismes aquatiques des faibles irradiations chroniques dues à la contamination du milieu. Études de sites plus poussées.

Référence

C. Amiard-Triquet et J.-C. Amiard, *Bull. écot.*, 1976, 7, 1, p. 3-32.

14. Un dosimètre biologique : les mutations somatiques de *Tradescantia*

1. Estimation de la dose de radioactivité reçue à proximité des centrales nucléaires

La construction de centrales nucléaires pose le problème de la [contamination permanente des populations avoisinantes](#). EDF estime que la dose reçue (1 à 5 mrems/an) ne représentera qu'une très faible fraction de la dose naturelle (100 mrems/an) ¹.

Deux questions :

1. Sur quoi repose cette affirmation ?
2. La nature de l'irradiation due à l'activité nucléaire est-elle assimilable à l'irradiation naturelle ?

Réponses EDF

1. Ce sont des estimations mathématiques fondées elles-mêmes sur les calculs de rejets d'effluents radioactifs (p. 6).

2. Il y a équivalence totale. [En fait, 80 % de l'irradiation naturelle est externe (p. 6).]

Après ces réponses, une question se pose : comment peut-on réellement mesurer l'incidence des rejets nucléaires sur des êtres vivants, sinon avec des êtres vivants ?

2. Présentation de « *Tradescantia* »

Les effets biologiques des radiations sont fondamentalement la destruction ou l'altération des macromolécules qui constituent les cellules de tout organisme. Les plus précieuses de ces molécules pour l'organisme sont les gigantesques chaînes d'ADN qui conservent dans chaque cellule le patrimoine génétique de l'espèce, exprimé sélectivement pour chaque tissu différencié. Les radiations produisent des modifications de cet ADN, qui se traduisent par des mutations* : somatiques pour les tissus différenciés, génétiques pour les cellules reproductrices.

1. *Tradescantia* est une fleur (la « misère ») dont certains gènes de coloration permettent une dosimétrie biologique très fine des altérations de l'ADN (mutations somatiques). Les poils des étamines de *Tradescantia* sont considérés comme un excellent matériel expérimental pour les études de radiobiologie car ils ont en général une seule cellule méristématique**. Des clones*** hétérozygotes**** pour la couleur des fleurs sont fréquemment utilisés pour la détermination du taux de mutation somatique. Les pétales de la fleur et les étamines (y compris les poils des étamines) sont normalement bleus, mais la couleur rose apparaît quand il y a mutation ou délétion du gène dominant pour la couleur bleue. Un événement mutationnel est alors défini par la présence de 2 ou plusieurs cellules roses contiguës ou d'une seule cellule rose entre 2 cellules bleues des poils étaminaux. On exprime le taux de mutation par le nombre d'événements mutationnels par poil ou par étamine. Le clone 02, le plus fréquemment utilisé, est perpétué par multiplication végétative à partir d'une bouture unique d'un *Tradescantia* hybride naturel entre une espèce à fleurs bleu violacé et une espèce à fleurs roses. Chaque inflorescence de ce clone produit au moins 50 fleurs et en moyenne une fleur fleurit quotidiennement selon les conditions. Chaque fleur a six étamines portant chacune environ 50 à 60 poils (intérêt : très grand nombre d'observations possibles).

2. La mutation somatique du gène étudié est provoquée par des agents aussi variés que les mutagènes chimiques, les rayons UV et ionisants (X, α , β , γ , neutrons) ². L'efficacité de ces agents est, de plus, augmentée par des conditions climatiques défavorables ³. Il n'y a pas d'effet notable des radiations pendant les 5-6 premiers jours de l'irradiation. Cet effet est maximum entre 9 et 15 jours après l'irradiation. Relation dose-effet : figure 1. Une première conclusion s'impose avec ce type de matériel : *il n'existe aucun seuil de sensibilité à l'irradiation*.

Un très grand nombre d'événements mutationnels pouvant être observé, la précision du test est conservée pour des doses inférieures à 1 rem ⁴. Or, l'argumentation actuelle d'EDF repose sur l'idée qu'il existe un

seuil de rayonnement au-delà duquel la relation dose effet est linéaire. En deçà, il n'y aurait pas d'effet observable (ce qui suggère non-toxicité) et les courbes ne seraient que le résultat d'extrapolations plus ou moins inexactes. Ainsi : « Au-dessous de 25 rems, sur l'homme, on ne peut pas mettre en évidence, sur le plan clinique, même avec les investigations les plus poussées, une action biologique significative » et « les experts internationaux estiment qu'en fait, on ignore si cette relation de proportionnalité entre la dose et l'effet existe dans le cas des doses faibles ». L'intérêt de *Tradescantia* est donc de démontrer expérimentalement qu'il n'existe pas de seuil biologique dû à une « insensibilité » ou une « adaptation » des organismes aux faibles doses.

3. Irradiation externe et irradiation interne. Un second aspect de la dosimétrie biologique développée avec *Tradescantia* est l'efficacité relative élevée de l'irradiation interne par rapport à l'irradiation externe. Cultivant la plante sur un sol radioactif (monazite, minerai de thorium naturel, émetteur α), Nayar et coll. ⁵ ont démontré que les mutations induites n'étaient pas en rapport avec le taux de radioactivité du sol lui-même, mais avec la teneur en émetteur α absorbé par *Tradescantia* dans les tissus (mesure après lavage, séchage et réduction en cendres). De plus, cette absorption est *capricieuse* et ne suit pas de façon rigoureusement proportionnelle la concentration radioactive du sol. Or, les dosimètres actuellement employés pour déterminer en continu la radioactivité d'un site sont essentiellement des appareils physiques (tels que les films radiosensibles) qui mesurent la radioactivité γ , éventuellement β . Ils ne peuvent, en aucun cas, tenir compte des incorporations de radionucléides dans les organismes végétaux ou animaux ; or dans ce cas, l'efficacité est supérieure à celle d'un flux externe.

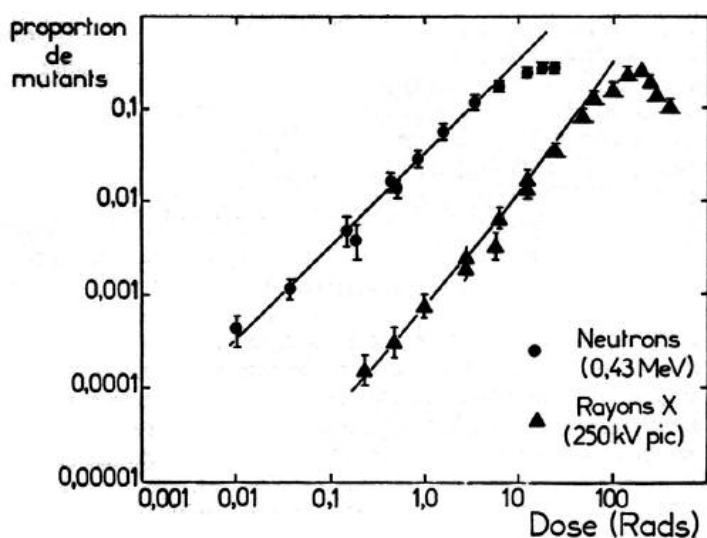


Figure 14. Relation linéaire dose-effet (échelles logarithmiques) entre l'irradiation par rayons X ou neutrons et le nombre de cellules mutantes. L'infléchissement des courbes pour les hautes doses provient de troubles de croissance de toute la plante.

* *Mutation* : changement héréditaire d'une partie du matériel génétique, modification physicochimique des gènes. L'apparition de caractères nouveaux ou l'expression de caractères masqués chez un hybride peut être due également à des recombinaisons du matériel génétique. Dans les cellules somatiques (non reproductrices), ces recombinaisons ne peuvent apparaître qu'après cassure et réarrangement des chromosomes.

** *Méristème* : zone de multiplication cellulaire intense à l'extrémité subterminale des organes végétaux en voie de croissance.

*** *Clone* : population de cellules ou individus résultant des divisions asexuelles d'une cellule ou d'un individu initial.

**** *Hétérozygote* : pour une fonction donnée, l'information portée par les 2 chromosomes homologues est différente.

3. Utilisation appliquée de « *Tradescantia* »

La disparité des résultats entre ces deux types de mesure : biologique avec *Tradescantia*, physique avec la dosimétrie utilisée officiellement, est confirmée par une étude minutieuse de Ichikawa et Nagata au Japon ⁶. Ces chercheurs ont utilisé le clone KU7 de *Tradescantia* pour révéler une action mutagène éventuelle, malgré leur faible niveau, des radiations émises par la centrale de Hamaoka. Les mesures de la radioactivité (préfecture locale) en différents points de 3 villes situées entre 2,5 et 8,5 km de la centrale révèlent une augmentation moyenne d'environ 9 mrems/an par la mesure des seuls rayons γ (β non inclus). La valeur officiellement prévue ne devait pas excéder 5 mrems d'augmentation par an. Si l'on considère que la dose de rayons (β est environ 1/3 de la dose de rayons γ pour un BWR, cela fait 12 mrems/an. Il s'agit d'une centrale qui comprendra 2 réacteurs. Le premier (type BWR, puissance 540 MWé) a fonctionné :

- pour des essais, du 13 août 1974 au 2 octobre 1974 en montant progressivement en puissance jusqu'à 300 MWé,

- puis, du 19 février 1975 au 11 octobre 1975,
- enfin, après fin février 1976, atteignant sa pleine puissance le 17 mars 1976.

Des plantes en pots ont été disposées en 9 emplacements différents, situés près de la centrale (de 0,58 à 2,7 km du réacteur n° 1) et en un point dans Sagara, ville voisine située à 8,3 km. Une augmentation importante des mutations par rapport aux témoins a été mise en évidence, de l'ordre de 30 % en moyenne. Un certain nombre d'agents mutagènes possibles et de facteurs susceptibles de modifier la fréquence des mutations spontanées sont passés en revue par les auteurs de l'étude. Ainsi, la température, la radioactivité naturelle et les retombées radioactives d'explosions nucléaires anciennes (en liaison avec les chutes de pluie et les différences géographiques observées), les pesticides et les polluants de l'air apportés par une circulation automobile plus intense sont éliminés comme causes possibles de l'augmentation observée des mutations; en effet, il n'y a pas de corrélation entre les périodes où ces facteurs auraient pu jouer et les périodes où une augmentation de la fréquence des mutations a été décelée. Les points où cette fréquence du taux de mutation a été le plus élevé sont les points 1 à 5 et le point 6 (figure 2). Ce dernier est le plus proche du réacteur, les points 1 à 5 sont situés dans la direction des vents dominants. Il apparaît en conséquence que, même si on ne peut dire que la radioactivité délivrée par la centrale énergétique nucléaire est entièrement et exclusivement responsable de l'augmentation des mutations, elle en reste la cause principale la plus probable. Compte tenu d'une dose de doublement des mutations de 1 rem, *la mesure biologique d'irradiation diffère en moyenne de plus d'un facteur 10 d'avec la mesure officielle**. Cette disproportion, sans être une mesure absolue de la différence entre dosimètres physique et biologique, soulève un doute sérieux quant à l'efficacité biologique et médicale de la méthode actuellement adoptée pour mesurer les radiations (exposition externe aux rayons γ).

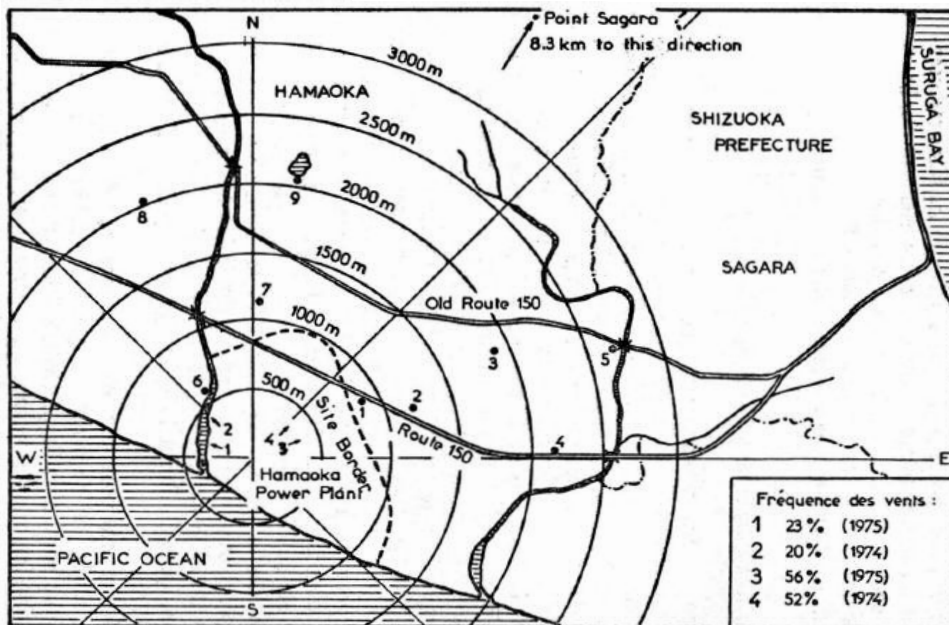


Figure 2. Situation de la centrale et des points d'observation. Les effluents radioactifs d'un BWR sont en majorité gazeux : 2 500 000 Ci/1 000 MW_e pour 70 à 130 Ci d'effluents liquides dont 50 à 100 Ci de ³H.
 → Direction des vents dominants, fréquence de ces vents pendant les périodes de fonctionnement de la centrale.
 Points 1 à 9 : points de culture de *Tradescantia*. Point Sagara : point de culture de référence.

* Ichikawa et Nagata tentent une explication de cette différence en tenant compte des rayons β et de certains aspects spécifiquement biologiques tels que l'attachement, l'incorporation et l'accumulation. Par exemple, l'effet de 5 noyaux émetteurs β distribués au hasard dans l'air peut être très différent selon leur disposition. S'ils sont tous à 5 cm de la cible (cellule de la plante), celle-ci absorbera une dose D1. Si 2 de ces noyaux s'attachent à la surface de la plante, à 0,2 cm de la cible, la dose absorbée est D2 = 35 x D1 et si les 5 noyaux s'attachent à la surface de la plante, la dose absorbée devient D3 = 86 x D1.

Remarques

1. Tous les gènes ne mutent pas avec une sensibilité aussi grande que la coloration de *Tradescantia*. La raison n'en est pas connue avec précision (composition du gène en bases, expression cytoplasmique). Chez l'homme, on ne connaît que quelques gènes et à peine leur sensibilité.
2. En France, les mesures d'irradiation sont effectuées par le SCPRI. Leurs résultats sont secrets. (*Journal officiel* du 21 juin 1966.)

Références

1. *L'Énergie nucléaire et les Effets biologiques des rayonnements*, EDF, Comité médical, direction de l'Équipement, décembre 1975.
2. A. H. Sparrow, L. A. Shairer et R. Villalobos-Pietrini, *Mutation Research*, 26, 1974, p. 265-276.
3. L. W. Mericle et R. P. Mericle, *Radiation Botany*, 5, 1965, p. 475-492.
4. A. H. Sparrow, *Science*, 176, 1972, p. 916-918.
5. G. G. Nayar, K. P. George et A. R. Gopalayengar, *Radiation Botany*, 10, 1976, p. 287-292.
6. S. Ichikawa, N. Nagata (1976), *The New Scientist* (à paraître).

15. Analyse et critique des cas de leucémie observés à Nagasaki et Hiroshima

Les populations de Nagasaki et Hiroshima ont été suivies médicalement de 1950 à 1970 avec attention, dans l'espoir d'informations sur le lien entre la dose d'irradiation reçue et la mortalité. Une analyse récente des cas de leucémie ¹ et une étude statistique sérieuse ² ont conduit aux courbes des figures 1 et 2 (p. 54-55). Ces courbes établissent la relation expérimentale qui existe dans le cas des deux villes précédentes entre la dose reçue au moment du flash de la bombe et la probabilité de leucémie radioinduite par million d'habitants et par an. Les barres d'erreurs indiquées correspondent à un intervalle de confiance de 95 %.

1. Critique de l'analyse des résultats

Ces critiques portent sur plusieurs points :

a. La population témoin choisie comme référence dans la soustraction (soit le P_0 sur les figures) est une population qui a reçu, au moment du flash de la bombe, une dose inférieure à 10 rads. Dans le cas où des effets existeraient pour de telles doses, cette soustraction masquerait les effets éventuels de doses plus élevées et pourrait même conduire à une apparence d'effets bénéfiques pour des doses supérieures à 10 rads ! (la courbe de Nagasaki montre une telle apparence bénéfique jusqu'à 180 rads).

b. Les leucémies ont été comptabilisées de 1950 à 1970. Pendant les 6 premières années après le flash, aucune comptabilité sérieuse n'a été faite. Toutes les évolutions rapides sont donc absentes des graphiques.

c. On suppose que le flash de la bombe est le seul responsable des leucémies radioinduites. On ignore donc les éventuelles radiocontaminations internes. Or, ces radiocontaminations concernent aussi bien les populations éloignées[*] du point de l'explosion que les populations proches. Le calcul de la « dose reçue » étant fait à partir de la distance séparant chaque individu du point de l'explosion, il faut tenir compte d'une erreur sur la dose reçue. Il manque donc une barre d'erreur horizontale pour chaque point des courbes 1 et 2.

[* Voir très éloignées avec les pluies noires.]

2. Critique des conclusions de l'analyse

G. Wolber conclut ainsi : « Les résultats sont représentés sur les courbes 1 et 2. On y trouve un « seuil » pratique de dose quand, pour les populations considérées, le risque ajouté est statistiquement différent de zéro. Pour Nagasaki, il est à 180 rads environ et pour Hiroshima à 20 rads. Pour les deux villes ensemble, ce seuil est à environ 70 rads. »

Il est contestable sinon malhonnête de déduire un « seuil » pratique de dose dès que le risque ajouté est statistiquement différent de zéro. Un tel raisonnement conduirait à souhaiter dès expériences plus imprécises pour que le « seuil » soit plus élevé. Les courbes 1 et 2 montrent au contraire que pour des doses inférieures à 70 rads, on ne peut rien conclure et donc surtout pas en déduire un « seuil ». Par contre, il ressort de façon particulièrement claire qu'à des doses élevées (supérieure

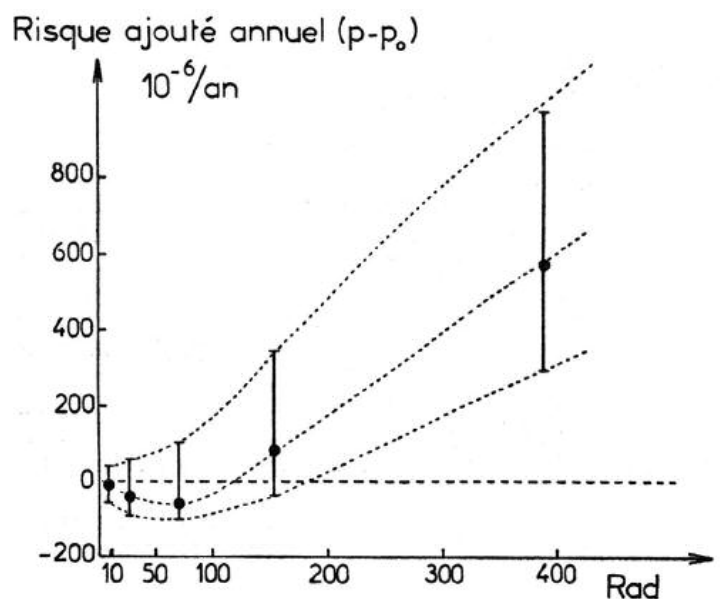


Figure 1. Leucémies à Nagasaki (1950-1970) d'après S. Jablon et H. Kato.

res à 200 rads), il existe un lien entre la dose reçue et la probabilité de leucémie. Pour des doses élevées, il est possible que la probabilité de leucémies soit très sous-estimée par suite des réserves indiquées au paragraphe 1. Néanmoins, si l'on croit ces courbes, on voit qu'à 200 rads la probabilité de leucémie est d'environ $200/10^6/\text{an}$ pour Nagasaki et environ $400/10^6/\text{an}$ pour Hiroshima. Les barres d'erreurs sont tellement grandes que si l'on veut donner des résultats à 95 % de niveau de confiance, les chiffres précédents deviennent à 200 rads : $500/10^6/\text{an}$ pour Nagasaki, $700/10^6/\text{an}$ pour Hiroshima, soit environ $600/10^6/\text{an}$ pour les deux villes. Ces résultats, difficilement extrapolables aux faibles doses, montrent de façon évidente qu'une très grande prudence s'impose avant de soumettre une population à une irradiation externe supplémentaire, de quelque intensité qu'elle soit.

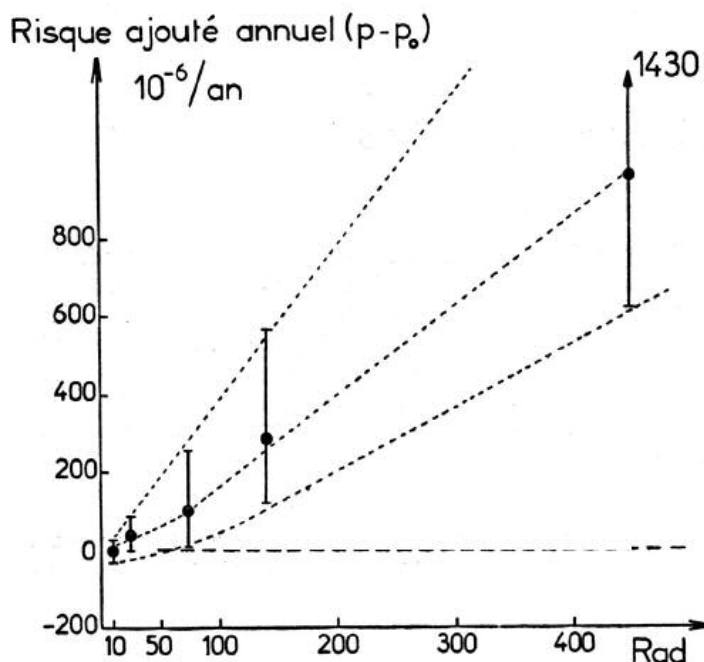


Figure 2. Leucémies à Hiroshima (1950-1970)
d'après S. Jablon et H. Kato

Références

1. S. Jablon et H. Kato, « Mortality among A-bomb survivors 1950-1970 », *Technical Report ABCC*, octobre 1971.
2. G. Wolber, « Méthode pratique de calcul de la fonction de probabilité du risque ajouté par l'irradiation », EDF, Comité de radioprotection, 29 décembre 1975.

16. Le chauffage électrique intégré

EDF prévoit que, en 1985, 2 millions de logements seront équipés d'un chauffage électrique intégré. La commission de l'Énergie du commissariat général au Plan a pris connaissance dans la réunion du 17 février 1976 d'une note de l'Agence pour les économies d'énergie (note du 27 janvier 1976) critiquant très fortement le chauffage électrique intégré. Il est significatif de constater que les conclusions de cette note n'ont pas été contestées par la commission. Ces conclusions sont les suivantes :

1. Bilan économique pour la collectivité

Les bilans actualisés de l'ensemble des dépenses occasionnées à la collectivité par la consommation énergétique d'un logement ne font pas apparaître d'avantages particuliers au profit du « tout électrique ».

Si la comparaison avec le fuel et le chauffage collectif au gaz est pratiquement équilibrée, les calculs font apparaître au contraire un avantage au profit du chauffage au gaz individuel. Cet avantage est particulièrement significatif dans le domaine des maisons individuelles.

2. Bilan en investissements pour assurer l'alimentation d'un logement

On constate que :

- le montant des investissements *totaux* est sensiblement indifférent selon la forme d'énergie choisie ;
 - par contre, les investissements pesant directement sur l'utilisateur sont nettement moins élevés pour l'électricité que pour les autres formes d'énergie, une part notable des investissements étant prise en charge, du moins en ce qui concerne le financement, par l'entreprise énergétique.
- L'écart atteint ainsi 2 500 F pour un logement collectif et de 6 000 à 14 000 F dans l'individuel (en francs au 1^{er} janvier 1975). Il est probable que ce facteur constitue actuellement un élément propice au développement du chauffage électrique et ce d'autant plus que le décideur est souvent distinct de l'utilisateur.

3. Le bilan en énergie

En termes de consommation d'énergie, il est acquis que le chauffage électrique est plus dispendieux en énergie primaire que les autres modes de chauffage. Toutefois, en raison de la contribu-

tion du nucléaire à la production de l'électricité, il peut conduire, après réoptimisation du parc de centrales, à des économies en combustibles fossiles [...]. Le développement du « tout électrique » doit être étroitement coordonné avec celui du nucléaire et, dans l'état actuel des choses, tout développement anticipé du « tout électrique » conduit pour plusieurs années encore à des dépenses supplémentaires du fuel. C'est ainsi que tout nouveau logement tout électrique présentement engagé ne peut apporter de gains en énergie fossile avant 1984.

L'Agence pour les économies d'énergie a rappelé qu'il existait un mode d'utilisation de l'électricité pour le chauffage, la pompe à chaleur, beaucoup plus favorable que les chauffages traditionnels, puisqu'il nécessite environ 2 fois moins d'électricité pour chauffer le même logement.

En conclusion, l'Agence pour les économies d'énergie a proposé la stratégie suivante

1. Interdire immédiatement tout nouveau chauffage à l'électricité par résistance.
2. Donner à EDF toute latitude pour développer le chauffage par pompe à chaleur ou tout procédé de chauffage ayant une efficacité comparable.

Un document de travail de la Délégation générale à l'énergie daté du 9 février 1976 donne les prévisions de la consommation d'électricité en 1985. Le tableau ci-dessous en donne quelques extraits :

Certaines comparaisons sont intéressantes :

Enfin, une note du ministère de l'Industrie et de la Recherche de février 1976 étudie le programme électronucléaire. Au paragraphe « financement » la conclusion est claire : « Les conditions de financement de ce programme dépendront essentiellement des possibilités d'action en matière tarifaire. »

	1980	1985
Chauffage électrique intégré	10 TWh*	20 TWh
Sidérurgie	15	17,50
Transport	8,5	10
Eurodif	15	25
Etc.
Total	264	364

*1 TWh - 1 Téra-watt-heure = 10¹² watts-heure.

17. Comparaisons internationales des PIB et des consommations d'énergie en 1973

Il ressort, du tableau présenté ci-contre, qu'une consommation d'énergie démesurée comme celle des États-Unis (13,87 tec/habitant/an contre 7,94 pour la Suède) ne change pratiquement pas le PIB/habitant (6 170 dollars contre 6 140 dollars pour la Suède). Et pourtant, le niveau de vie du Suédois n'est pas très différent de celui de l'Américain.

Aussi, lorsqu'on parle de la nécessité d'une croissance économique, faut-il préciser s'il s'agit :

1973	France	Allemagne	Italie	Bénelux	Roy.-Uni	Total CEE	Suède	Espagne	États-Unis	URSS	Japon
Population en milliers (taux de croissance depuis 1963 en % par an)	52 177	61 967	54 888	23 530	56 021	256 661	8 138	34 730	210 404	248 600	108 350
PIB par hab. en dollars courants (taux de croissance du PIB en volume depuis 1963 en % par an)	4 900	5 610	2 510	4 520	3 100	4 112	6 140	1 750	6 170	2 731	3 760
Structure du PIB en % :											
- agriculture	6,2	2,9	8,8	—	2,9	—	4,2	12,7	4,4	20,3	5,8
- industrie	45,9	52,1	41,2	—	42,6	—	40,3	35,5	33,9	51,3	48,3
- transports, services	47,9	45,0	50,0	—	54,5	—	55,5	51,8	61,7	28,4	45,9
	100,0	100,0	100,0		100,0		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Consommation finale d'énergie par hab. en tonnes d'équivalent charbon (tec)	4,98	6,50	3,60	7,52	5,85	5,46	7,94	2,43	13,87	**	4,46
dont % :											
- charbon	9,0	11,2	3,0	7,8	13,5	9,5	2,5	9,3	3,8	—	8,2
- gaz	15,3	19,6	19,5	40,3	23,1	21,8	1,9	9,2	40,8	—	10,5
- pétrole	52,6	43,7	52,8	33,8	34,7	44,0	54,8	52,3	31,6	—	48,8
- électricité	23,1	25,5	24,7	18,1	28,7	24,7	40,8	29,2	23,8	—	32,5
	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		100,0
Nombre pour 1 000 hab. :											
- automobiles de tourisme*	261	240	210	213	219	234	291	82	446	8	101
- téléphone*	199	268	206	275	314	251	576	164	628	58	315
- télévision*	237	293	202	239	305	258	333	145	474	198	225

* Résultats de 1972.
** Résultats de 1971.

- d'une croissance énergétique ; et le tableau laisse penser qu'à partir d'un certain niveau c'est simplement une croissance du gaspillage,
- d'une croissance du PIB ; et le tableau montre que ce critère est indépendant du précédent,
- d'une croissance de la qualité de la vie...,
- etc.

Rappelons qu'en 1973 la consommation totale d'énergie en France était de 260 millions de tec et que la direction d'EDF prévoit qu'elle sera de 600 millions de tec en l'an 2000 (pour 65 millions d'habitants). Il nous semble que tous ces problèmes sont politiques et que ce n'est pas le rôle des scientifiques que de trancher. La direction d'EDF veut imposer un modèle de croissance. Il n'est pas non plus évident que cela soit son rôle.

Rappel de quelques définitions

pib : la pib (production intérieure brute) exprime la production globale de « l'entreprise France » : c'est la somme des « valeurs ajoutées » (ventes moins achats courants) créées par tous les producteurs industriels, agricoles, artisanaux, commerciaux, etc., implantés en France.

PIB : le produit intérieur brut (PIB) = production intérieure brute (pib) + service des administrations et institutions financières. Les économistes considèrent souvent que c'est une mesure du niveau de vie.

tec : tonne-équivalent-charbon = quantité d'énergie dégagée par la combustion d'une tonne de charbon.

18. Commission PEON

La commission PÉON (Production d'électricité d'origine nucléaire) est une commission consultative auprès du gouvernement français.

Sa composition est la suivante :

Président de la commission

M. Jean Couture, secrétaire général de l'Énergie.

Membres de droit

L'administrateur général délégué du commissariat à l'Énergie atomique (M. Giraud).

Le haut commissaire à l'Énergie atomique (M. Yvon).

Le secrétaire général de l'Énergie (M. Couture).

Le commissaire général du Plan d'équipement et de la Productivité (M. Montjoie).

Le directeur du Gaz, de l'Électricité et du Charbon (M. Malegarie).

Le directeur des Industries chimiques, textiles et diverses (M. Rauline).

Le directeur de la Construction mécanique et électrique et de l'Électronique (M. Colonna).

Le directeur général d'Électricité de France (M. Boiteux).

Le directeur de l'équipement d'Électricité de France (M. Guilhamon).

Le directeur [des Piles atomiques](#) du commissariat à l'Énergie atomique (M. Horowitz).

Membres nommés pour 4 ans (au 1^{er} décembre 1970) ¹

M. Aicardi, secrétaire général au commissariat général du Plan.

M. Baumgartner, président-directeur général d'Hispano-Alsacienne.

M. Blancard, vice-président du Conseil général des mines, délégué ministériel pour l'Armement.

M. Buchalet, administrateur délégué aux questions nucléaires de Schneider S.A.

M. Chevrier, directeur général adjoint d'Électricité de France.

M. Danzin, vice-président-directeur général de Thomson CSF.

M. Dejou, directeur des études et recherches d'Électricité de France.

M. Destival, rapporteur général de la commission de l'Énergie au commissariat général du Plan.

M. Favier, conseiller maître à la Cour des comptes.

M. Glasser, président-directeur général de la société Alsthom.

M. Jouven, président-directeur général de Pechiney.

M. Koch, administrateur-directeur général de la Compagnie électromécanique.

M. La Genière (de), directeur du Budget au ministère de l'Économie et des Finances.

M. Lalande de Calan (de), président de la société Babcock et Wilcox*.
M. Larre, directeur du Trésor au ministère de l'Économie et des Finances.
M. Mabile, directeur des Productions au commissariat à l'Énergie atomique
M. Malcor, président-directeur général de la compagnie Creusot Loire (groupes Marine-Schneider).
M. Moch, vice-président de l'ERAP.
M. Pascal, directeur administratif du commissariat à l'Énergie atomique.
M. Roux, vice-président du Conseil national du patronat français.
M. Serise, directeur de la Prévision au ministère de l'Économie et des Finances.

Membres nommés, présents actuellement²

M. Aicardi, secrétaire général au commissariat général du Plan d'équipement et de la productivité.
M. Capoulade, directeur général adjoint de la Compagnie française de raffinage.
M. Chevrier, directeur général adjoint d'Électricité de France.
M. Dejou, directeur des études et recherches d'Électricité de France.
M. Destival, ingénieur en chef des Mines au commissariat général du Plan d'équipement et de la productivité.
M. Fauroux, directeur général adjoint de la société Saint-Gobain Pont-à-Mousson.
M. Koch, vice-président-directeur général de la Compagnie électromécanique.
M. La Genière (de), sous-gouverneur de la Banque de France.
M. Leny, directeur général de la société Framatome.
M. Prudhomme, professeur à l'Institut d'urbanisme de l'université Paris-Val-de-Marne.
M. Roux, président-directeur général de la Compagnie générale d'électricité.
M. Schulz, président-directeur général de la société Alsthom.
M. Taranger, directeur des productions au commissariat à l'Énergie atomique.
M. Thomas, président-directeur général de la société Pechiney-Ugine-Kuhlmann.
[M. Vendryes](#), délégué à la mission Applications industrielles nucléaires au commissariat à l'Énergie atomique.
M. Villemejeane (de), directeur général de la société Imétal.

Compte tenu de la composition de cette commission, on ne s'étonnera pas qu'elle prenne des positions tendant à favoriser le développement massif de l'industrie électronucléaire. Tous les grands trusts pouvant tirer profit de ce développement sont largement représentés dans cette commission!

* Le fabricant du réacteur de [Three Mile Island](#).

Références

1. *Les Dossiers de l'énergie*, ministère de l'Industrie et de la Recherche, 1970.
2. *Journal officiel* du 28 janvier 1976, arrêté du ministre de l'Industrie et de la Recherche, en date du 31 décembre 1975.

19. Serment de secret sur la pollution radioactive pour les membres du SCPRI

MINISTÈRE DES AFFAIRES SOCIALES

Décret n° 66-406 du 15 juin 1966 fixant les conditions de commissionnement et d'assermentation des personnels chargés du contrôle des pollutions de tous ordres causées par des substances radioactives.

Le Premier ministre,

Sur le rapport du garde des Sceaux, ministre de la Justice, et du ministre des Affaires sociales,
Vu la loi n° 61-842 du 2 août 1961 relative à la lutte contre les pollutions atmosphériques et les odeurs portant modification de la loi du 19 décembre 1917,
Vu le décret n° 63-1228 du 11 décembre 1963 relatif aux installations nucléaires,
Décrète :

Art. 1er. - Les agents du service central de protection contre les rayonnements ionisants, chargés du contrôle et de la constatation des infractions en ce qui concerne les pollutions de tous ordres causées par des substances radioactives, sont commissionnés par arrêté du ministre des Affaires sociales.

Art. 2. - Avant d'entrer en fonctions, les agents du service central de protection contre les rayonnements ioni-

sants dûment commissionnés prêtent, devant le tribunal d'instance dans le ressort duquel ils sont domiciliés, le serment ci-après :

« Je jure de bien et fidèlement remplir mes fonctions et de ne rien révéler ou utiliser de ce qui sera porté à ma connaissance à l'occasion de leur exercice. »

Mention de la prestation de serment est portée sur l'acte de commission par les soins du greffier du tribunal d'instance. En cas de mutation de l'intéressé, il n'y a pas lieu à nouvelle prestation de serment.

Art. 3. - Le garde des Sceaux, ministre de la Justice, et le ministre des Affaires sociales sont chargés, chacun en ce qui le concerne, de l'exécution du présent décret, qui sera publié au *Journal officiel* de la République française.

Fait à Paris, le 15 juin 1966

Par le Premier ministre, Georges Pompidou
Le ministre des Affaires sociales, Jean-Marcel Jeanneney
Le garde des Sceaux, ministre de la Justice, Jean Foyer

Table

Avertissement au lecteur	2
Principaux sigles utilisés	2
1. Introduction	3
1. Prix de revient, ...4. - 2. Indépendance nationale, ...4. - 3. Expérience scientifique et technique du CEA, ...5. - 4. Problèmes techniques, ...5.	
2. Définition de quelques termes techniques	7
3. Chaîne suivie par le combustible nucléaire	8
4. Pollution radioactive d'une centrale nucléaire PWR en fonctionnement normal	9
1. Effluents gazeux,9. - 2. Effluents liquides,10.	
5. Problème des rejets d'eau	10
1. Besoins en eau et conséquences des rejets sur l'environnement physique,11. - 2. Conséquences sur le milieu vivant,11.	
6. Le retraitement des combustibles irradiés et le stockage des déchets	12
7. Sécurité des réacteurs PWR et surgénérateurs. Transport de matières radioactives ...	13
1. Accident dans un réacteur PWR, ...14. - 2. Accidents dans les surgénérateurs, ...15. - 3. Transport de matières radioactives, ...16.	
8. Concentration des radionucléides dans la chaîne alimentaire et quelques effets écologiques ...	17
1. La pollution radioactive du milieu marin, ...8. - 2. La pollution radioactive des eaux fluviales, ...19. - 3. La pollution radioactive des sols, des plantes et des animaux terrestres, ...19. - 4. Exemple de pollution radioactive du milieu terrestre, ...20.	
9. Problèmes biologiques	21
1. Les différentes sources d'irradiation, ...21. - 2. Effets biologiques des radiations ionisantes, ...22. - 3. Le contrôle et les normes, ...25.	
10. Quelques remarques au sujet des problèmes économiques ...	26
1. L'électronucléaire assure-t-il l'indépendance énergétique de la France ?, ...26. - 2. Rendement et bilan énergétique dans l'utilisation de l'électricité, ...27.	
11. Conséquences pour les libertés individuelles et collectives	28
1. Système policier de surveillance nucléaire, ...28. - 2. Entrave aux libertés, ...28.	
12. La prolifération de l'arme nucléaire	29
13. Conclusion	30

Annexes

1. Le fonctionnement d'un réacteur PWR	31
2. Principe de fonctionnement d'un réacteur surgénérateur type Phénix ...	31
3. L'accident de référence de Super-Phénix	32
4. Sûreté comparée des différentes filières de réacteurs	33
5. Problèmes de sûreté des réacteurs à neutrons rapides ...	34
6. Carte des sites nucléaires	37
7. Les déchets provenant des centrales nucléaires	38
8. Le plutonium, problèmes biologiques et médicaux ...	41
9. Contamination biologique par le plutonium	43
10. Technique de réfrigération des centrales nucléaires ..	44
11. Besoins en eau des centrales nucléaires et possibilités des fleuves en France	45
12. Impact des rejets d'eaux chaudes en milieu marin ..	46
13. La pollution radioactive du milieu aquatique et ses conséquences écologiques	48
14. Un dosimètre biologique : les mutations somatiques de <i>Tradescantia</i> ...	51
15. Analyse et critique des cas de leucémie observés à Nagasaki et Hiroshima	54
16. Le chauffage électrique intégré	55
17. Comparaisons internationales des PIB et des consommations d'énergie en 1973 ...	56
18. Commission PEON	57
19. Serment de secret sur la pollution radioactive pour les membres du SCPRI.....	58