

1972?

SUPPLEMENT A

SURVIVRE ... **et Vivre**

**LA POLLUTION
RADIOACTIVE**

Y. LE HENAFF

LA POLLUTION RADIOACTIVE

par Y. LE HENAFF

Aux grands maux, les petits remèdes
n'apportent pas de petits soulage-
ments, ils n'apportent rien.

John Stuart Mill

PRESENTATION

L'honnête homme d'aujourd'hui doit pouvoir se faire une opinion personnelle sur une évolution de l'environnement qui le concerne autant, sinon plus, que l'héritage de quelques francs qu'il envisage de laisser à ses enfants.

Le but de ce texte est d'expliquer aux profanes, aussi simplement que possible :

- a) Le rayonnement et la radioactivité,
- b) Les effets du rayonnement dans la matière et en particulier dans les organismes vivants,
- c) L'augmentation de la radioactivité ambiante due aux centrales électriques nucléaires et aux explosions nucléaires,
- d) La controverse entre experts "pour" et experts "contre" l'augmentation du nombre des centrales nucléaires (leur avis n'est pas sollicité en ce qui concerne les explosions nucléaires militaires).

Les mouvements d'opposition aux centrales nucléaires deviennent de plus en plus puissants parce qu'ils ont changé de camp. Les nouveaux protagonistes ne sont plus des illuminés ou des étudiants excités, mais des hommes responsables de 30 à 55 ans, qui ont le temps et les moyens de se consacrer à cette cause. C'est là que réside la force d'un mouvement qui gagne peu à peu le monde libre. La controverse n'est plus alimentée par un manque d'information ni une hystérie collective, elle ne vise plus le taux des rejets radioactifs dans l'atmosphère ou la pollution thermique, elle est désormais dictée en l'absence de toute émotivité par des jugements de valeur ... L'opinion qui veut désormais participer aux décisions prises par le gouvernement ou les industriels leur demande : "où ces décisions nous mèneront-elles" et "souhaitons nous vraiment en arriver là".

James Wright - Directeur à Westinghouse,
Foire des Industries Nucléaires, Bâle Oct 1972.

Imprimé par "LIRE" 16 rue Sainte - marseille
Edité par "Survivre et Vivre" - 5 rue Thorel - 75002 Paris
Directeur de la publication : Pierre Samuel ;
La reproduction totale ou partielle de ce texte est
vivement encouragée

INTRODUCTION

La première version de ce texte ronéoté à 500 exemplaires a été épuisée rapidement. Cette nouvelle édition bénéficie des critiques apportées par les lecteurs du premier texte. Merci à toutes et à tous. L'enseignement parallèle sera ce que nous le ferons. La partie "cours de physique" (chap. I et II) peut paraître encore indigeste à certains, mais essayez donc vous-même d'expliquer à quelqu'un les effets du rayonnement sans lui avoir expliqué auparavant la structure de la matière et, en quoi consistait ces rayonnements :

Il faut démystifier l'"Atome" et ce, pour plusieurs raisons. L'homme a toujours eu peur des phénomènes insolites et la peur, mauvaise conseillère, est trop facilement et trop souvent utilisée par les gouvernements autoritaires pour manipuler les foules - exemple, de Gaulle dans son dernier discours électoral : "C'est moi ou le chaos". Ce prophète a disparu et il n'y a pas plus - ni moins - de chaos qu'en son temps. Nous avons eu peur des premiers trains, des premières automobiles, des premiers avions. Aujourd'hui, les sorciers du gouvernement sortant tour à tour des bombes atomiques ou des réacteurs de leur chaudron magique où grouillent les Atomes tentent de subjuguier la tribu dans une acceptation passive de leur loi. Paul Valéry qui était loin d'être un anarchiste avait très bien résumé ce programme : "La politique est l'art d'empêcher les gens de s'occuper de ce qui les regarde". Ainsi, le public est maintenu sciemment dans l'ignorance des principaux problèmes de son temps par une éducation qui - lorsqu'elle existe - est volontairement hyperspécialisée ou à côté. Cette information "à côté" réapparaît de plus belle à la télévision où on s'étend complaisamment sur les ennuis des voisins et on minimise - quand on ne passe pas sous silence - nos propres ennuis, de manière à montrer au bon peuple qu'il a le meilleur gouvernement possible. En ce qui concerne la pollution radioactive, impossible à cacher étant donné le bruit à l'étranger, l'opinion publique sera mise en condition par des "experts" soigneusement choisis par le parti au gouvernement. Or il y a très peu d'experts prophètes et, encore moins d'experts prophètes désintéressés. On dit au public que l'"Atome" (comme la Guerre ou la Médecine) est une chose très compliquée et qu'il vaut mieux pour son bien qu'il s'en remette aux dirigeants. A vous de juger.

Le premier objectif de ce texte est de démystifier l'atome. Mais il est bien évident qu'une telle entreprise débouche sur une affaire politique. L'énergie atomique n'est ni nécessaire ni suffisante au bonheur de l'humanité comme voudraient le faire croire les technocrates. Ainsi, par delà l'énergie atomique, c'est tout un mode de vie qui doit être remis en cause. Si comme le veut le très prolifique Debré, nous devons être plus nombreux que les petits Chinois pour défendre avec succès la mère patrie, et si, comme le veulent les communistes, nous devons avoir chacun une machine à laver et une voiture (comme en Russie ?) ; alors l'énergie nucléaire est nécessaire, mais je préfère ne pas vivre dans ce monde là.

I - LA STRUCTURE DE LA MATIERE

Toutes les matières, tous les corps physiques que nous connaissons depuis le mouche-ron jusqu'aux galaxies d'étoiles dans le ciel sont construits avec quelques particules. Ces particules se groupent en atomes et les atomes se regroupent pour former des molécules ; c'est le domaine de la physique. La chimie étudie l'association des différentes molécules entre elles ; c'est un problème bien plus compliqué que celui de la physique parce qu'il y a une quantité innombrable de molécules - et on en crée de nouvelles chaque jour - ayant toutes des propriétés différentes. La biologie étudie, entre autres, la cellule vivante qui est un regroupement de plusieurs millions de molécules. Outre le problème chimique considérable que représente la cellule, le biologiste n'a pas encore réussi à comprendre ce qui fait qu'une cellule vit. On n'a pas encore réussi à fabriquer une cellule chimiquement, ni, évidemment, à en faire vivre une.

Nous allons voir dans ce premier chapitre à partir de quoi et comment est composée la matière. C'est le chapitre emmêlant, comme au début d'un roman, où l'auteur vous présente les personnages, rien de plus.

Noyau, atomes et molécules

Tous les corps de la nature sont composés d'atomes. L'atome est constitué par un noyau central contenant des nucléons, autour duquel tournent des électrons en décrivant des orbites plus ou moins éloignées du noyau. Voici, schématisée, l'image de différents atomes. Le chiffre au centre du noyau représente le nombre de nucléons qu'il contient.

ATOMES

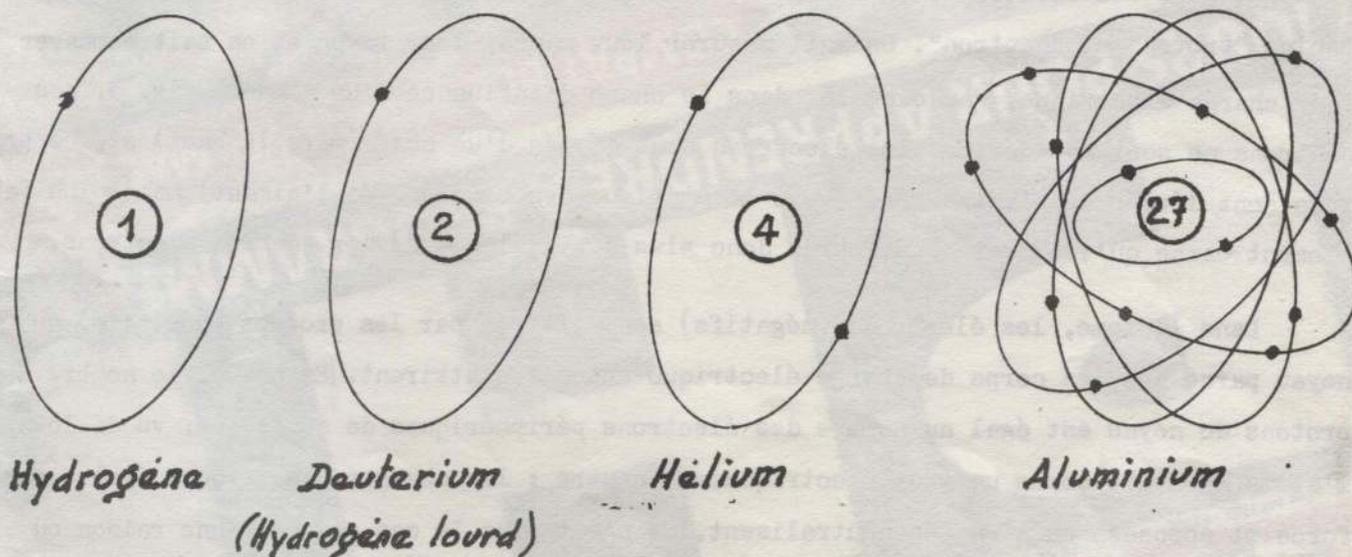


Fig: 1, Différents types d'atomes, à 1, 2, et 13 électrons.

Les électrons sont de petites boules "chargées" d'électricité négative. Le courant électrique par exemple est un courant d'électrons. Comme nous le verrons plus loin, les électrons atomiques tournent à une vitesse si grande qu'on peut pratiquement parler d'un nuage d'électrons autour du noyau, d'autant plus que l'expression "petite boule" contribue au flou de l'image.

Les nucléons du noyau sont de deux types : protons et neutrons. Voici, schématisée, l'image de trois noyaux. Le cercle blanc représente le proton, le cercle noir le neutron.

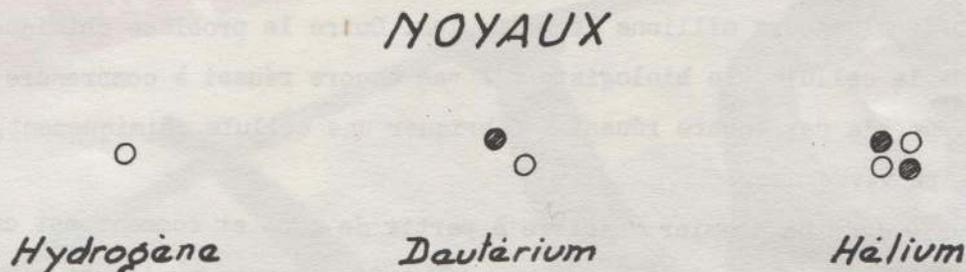


Fig: 2, Différents types de noyaux à 1, 2 et 4 nucléons

En réalité, les nucléons sont eux aussi très animés et tournent les uns autour des autres à des vitesses considérables. Les protons sont de petites boules 1800 fois plus pesantes que les électrons et de charge électrique égale et opposée (donc positive) à celle de l'électron. Les neutrons ont à peu près la même masse que les protons et, comme leur nom l'indique, ils n'ont pas de charge électrique : ils sont électriquement neutres. Pas plus que pour les électrons, on ne sait de quelle manière sont faites les petites boules "proton" et "neutron". On sait mesurer leur masse, leur rayon et on sait comparer leur charge électrique. Par exemple, dans le champ d'influence d'un aimant, fig. 3, les neutrons ne sont pas déviés, les électrons sont déviés d'un côté (vers le haut) et les protons sont déviés de l'autre côté (vers l'intérieur des branches de l'aimant) mais plus faiblement parce qu'ils sont plus lourds donc plus difficiles à dévier que les électrons.

Dans l'atome, les électrons (négatifs) sont attirés par les protons (positifs) du noyau parce que les corps de charge électrique opposée s'attirent. En outre, le nombre de protons du noyau est égal au nombre des électrons périphériques de sorte que, vu de loin, l'atome apparaît comme un tout électriquement neutre : les charges électriques égales en force et opposées en signe se neutralisent. Ce n'est plus le cas si, pour une raison ou une autre, un électron se trouve arraché à l'atome. L'atome ne sera plus électriquement

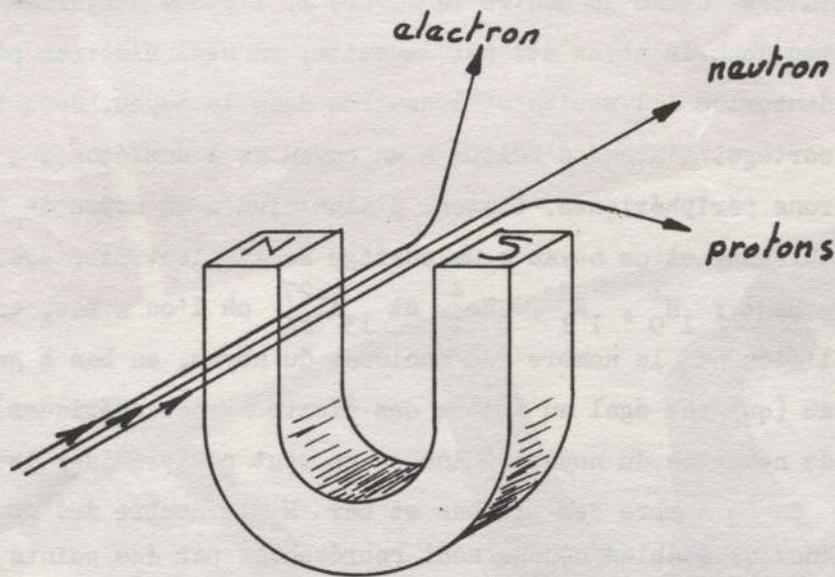


Fig: 3 Déviation des particules chargées dans un champ magnétique

neutre, mais chargé positivement. L'atome est dit alors une fois ionisé⁽⁺⁾. Notons tout de suite que les électrons ne "tombent" pas sur les protons du noyau. Ils restent sur des orbites fixes où l'attraction électrique vers le noyau central est équilibrée par la force centrifuge de leur mouvement tournant ^(x).

Il existe plus d'un millier de types d'atomes qui diffèrent essentiellement par le nombre de neutrons et de protons de leur noyau. Chaque noyau complète au besoin son cortège d'électrons en attirant à lui des électrons libres ou en volant les électrons des atomes

(+) Pour avoir une idée de la force électrique entre les électrons et les noyaux, imaginons qu'on puisse enlever tous les électrons contenus dans un millimètre cube du métal d'une fusée de lancement de satellite et qu'on les maintienne au pied de la fusée. L'attraction entre les électrons et les atomes dépouillés serait telle que la fusée ne pourrait pas partir.

(x) On peut se demander pourquoi les protons de même charge électrique, confinés dans l'espace restreint du noyau, ne se repoussent pas jusqu'à faire éclater ce noyau. C'est le mystère pas encore élucidé des "forces nucléaires" : comme les électrons assurent la cohésion de la molécule, des "mésons", autres types de particules, s'échangeraient entre les nucléons pour assurer la cohésion du noyau. Les forces nucléaires sont très intenses et à très court rayon d'action, de l'ordre du diamètre du proton. Les forces dues aux charges électriques sont beaucoup moins intenses mais ont une portée beaucoup plus grande, de l'ordre du diamètre des atomes.

voisins, de manière à former un atome électriquement neutre ayant exactement autant d'électrons que de protons. Comme le montre la figure 1, l'atome d'hydrogène est le plus simple : un seul proton dans le noyau et, par la suite, un seul électron périphérique. Puis vient l'atome de deutérium : 1 proton et 1 neutron dans le noyau, donc toujours un seul électron dans le cortège. L'atome d'hélium a un noyau de 4 nucléons : 2 protons + 2 neutrons, et 2 électrons périphériques. L'atome d'aluminium a un noyau de 27 nucléons : 13 protons + 14 neutrons, et ce noyau a un cortège de 13 électrons, etc... . Leur notation est respectivement : ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$, ${}^4_2\text{He}$ et ${}^{27}_{13}\text{Al}$ où l'on a mis, en haut à droite des initiales de l'élément, le nombre des nucléons du noyau, en bas à gauche le nombre de protons du noyau (qui est égal au nombre des électrons périphériques) et en bas à droite le nombre de neutrons du noyau. Quand on ne veut pas préciser leur nombre, on désigne parfois par Z le nombre des protons et par N le nombre des neutrons du noyau atomique. Les 251 "noyaux stables" connus sont représentés par des points sur le graphique de la fig. 4. Par exemple, le noyau de phosphore ${}^{31}_{15}\text{P}$ est représenté par le point à l'intersection $N = 16$, $Z = 15$; le noyau d'or ${}^{197}_{79}\text{Au}$ est à l'intersection $N = 118$, $Z = 79$. De part et d'autre de ces noyaux se trouvent d'autres noyaux instables (ou radioactifs) qu'on n'a pas représenté. Les 8 derniers points représentent les noyaux radioactifs qu'on trouve dans la nature. On en a fabriqué d'autres - tous instables - jusqu'à $N = 160$ et $Z = 105$. On peut imaginer la zone des noyaux stables comme le fond d'une vallée. Les noyaux instables sont sur les flancs de cette vallée et tendent à se transformer par émission de particule(s) de manière à tomber au fond de la vallée parmi les noyaux stables.

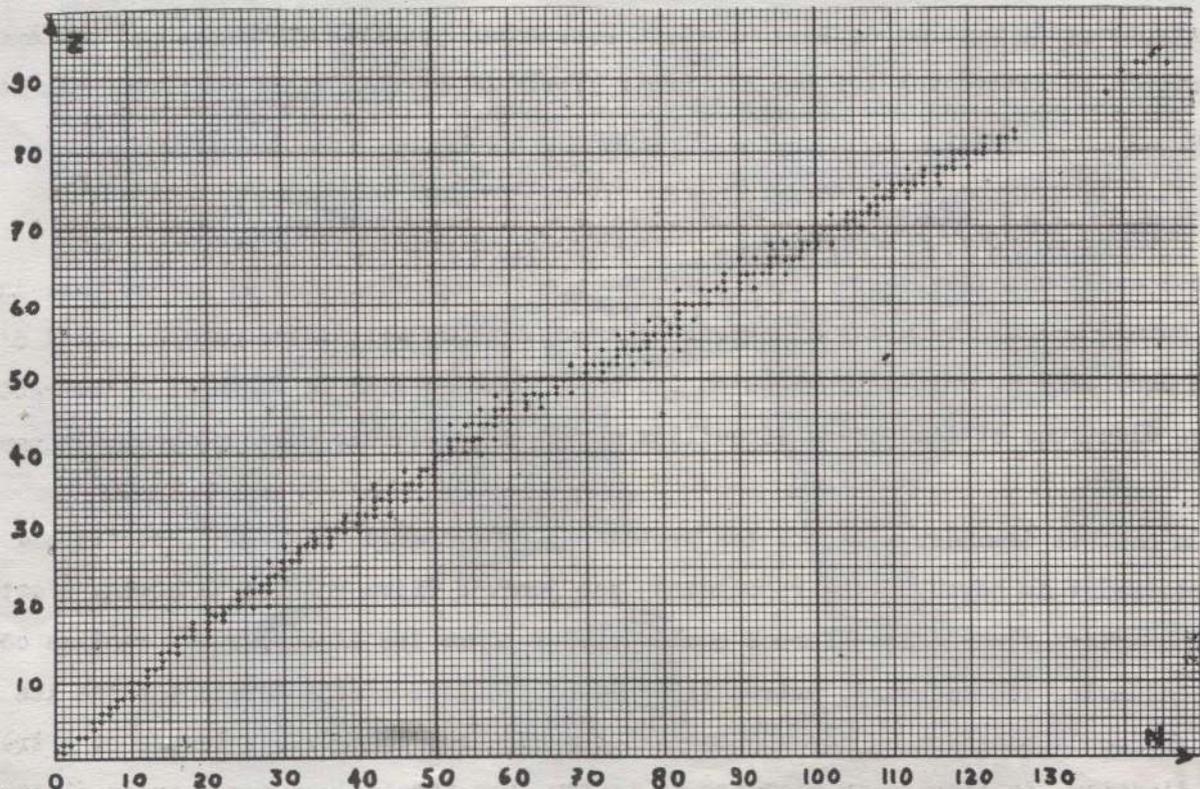


Fig. 4 . Les noyaux stables et les 8 noyaux radioactifs naturels ou fabriqués par l'homme.

Avant d'aller plus loin citons quelques chiffres pour avoir une idée des dimensions de ces objets. Le proton et le neutron ont un diamètre d'environ 1 milliardième de millimètre et pèsent à peu près le même poids l'un et l'autre : 1 milliard de milliards de protons par exemple ne pèsent que 1,6 milliardième de gramme. Dans l'atome d'hydrogène, l'électron tourne sur une orbite dont le diamètre est de l'ordre d'un dixième de milliardième de millimètre, soit environ 100 000 fois plus grand que le diamètre du proton central, et sa vitesse orbitale est de l'ordre de 2 200 km par seconde. Si l'on pouvait grossir l'atome d'hydrogène pour que le proton apparaisse comme une bille (1 cm de diamètre), l'électron tournerait autour sur un cercle de 1 km de diamètre, boule floue vaguement perceptible. Remarque importante pour la suite : il y a énormément de vide dans l'atome entre le noyau et les électrons.

Les atomes ayant un nombre Z de protons différents ont un nom différent (exemples, $Z = 1$: hydrogène et $Z = 2$: hélium), on dit que ce sont des éléments chimiques différents. Il existe dans la nature 92 éléments chimiques différents, stables ou non, depuis l'hydrogène $Z = 1$ jusqu'à l'uranium $Z = 92$, et une douzaine d'autres plus ou moins instables ont été créés artificiellement, exemple : le plutonium $Z = 94$.

On appelle isotopes des atomes qui ont le même nombre Z de protons et un nombre N de neutrons différents dans leur noyau, exemple : l'hydrogène ${}^1_1\text{H}$, le deutérium ou hydrogène lourd ${}^2_1\text{H}$ et le tritium ${}^3_1\text{H}$ sont les trois isotopes de l'hydrogène. Comme les propriétés chimiques d'un atome dépendent de ses électrons et que deux isotopes ayant le même nombre de protons ont aussi le même nombre d'électrons, leurs propriétés chimiques sont les mêmes.

Chacun des 92 éléments chimiques a un ou plusieurs isotopes. Il existe 325 isotopes naturels, c'est à dire qu'on trouve dans la nature, et près de 1200 isotopes artificiels, c'est à dire fabriqués par l'homme. La fig. 5 montre, en plus complet et détaillé, le début du graphique de la fig. 4 ; c'est ce qu'on appelle le (début du) tableau des noyaux atomiques, moins difficile à lire qu'un horaire de chemin de fer.

Chaque élément chimique est sur une ligne horizontale avec son symbole ou initiale dans la case de l'extrême gauche. Le nombre Z de protons est indiqué à gauche à l'extérieur des cases : $Z = 0$ pour la première ligne où se trouve le neutron n^1 , puis sur la deuxième ligne où $Z = 1$ l'hydrogène ${}^1_1\text{H}$, le deutérium ou l'hydrogène lourd ${}^2_1\text{H}$ et le tritium ${}^3_1\text{H}$ qu'on pourrait appeler hydrogène super lourd. Sur la ligne $Z = 2$, on trouve les 5 isotopes de l'hélium, etc ... Il est utile de connaître le nombre N de neutrons dans chaque élément, le chiffre au pied de chaque colonne indique le nombre de neutrons de tous les éléments de cette colonne. Ainsi, l'hélium He^3 a deux protons et un

A titre d'exemple, voici la composition chimique moyenne du corps humain et la quantité approximative de chacun des éléments dans un homme de 70 kg.

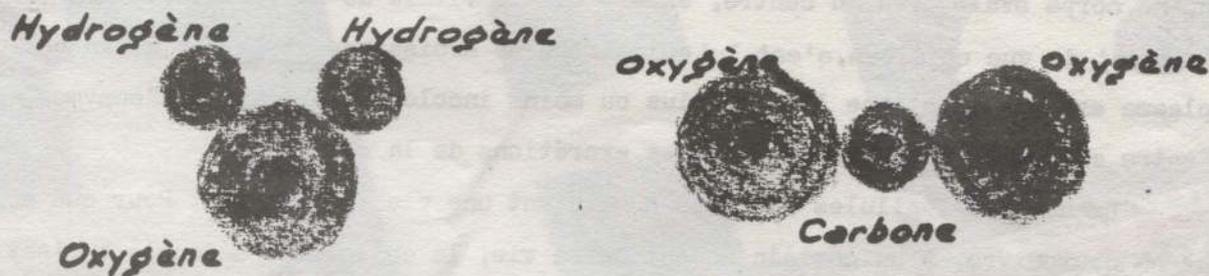
Composition chimique moyenne de l'organisme humain adulte

ELEMENT	POURCENTAGE EN POIDS	QUANTITE APPROXIMATIVE (en g) DANS UN HOMME DE 70 kg
Oxygène	65	45 500
Carbone	18	12 600
Hydrogène	10	7 000
Azote	3	2 100
Calcium	1,5	1 050
Phosphore	1	700
Soufre	0,25	175
Potassium	0,2	140
Sodium	0,15	105
Chlore	0,15	105
Magnésium	0,05	35
Fer	0,006	4
Manganèse	0,000 03	0,02
Cuivre	0,000 2	0,1
Iode	0,000 04	0,03

Le fait qu'il n'y ait que 30 milligrammes d'iode par exemple dans le corps humain ne doit pas faire illusion : le nombre d'atomes correspondant est très grand. Pour avoir le nombre d'atomes dans 1 g d'un élément, il suffit de diviser le nombre $6 \cdot 10^{23}$ (abréviation pour 6 suivi de 23 zéros) par le nombre de nucléons de cet élément. Ainsi, dans 1 g d'iode I^{129} (iode à 129 nucléons) il y a $6 \cdot 10^{23} / 129 = 4,7 \cdot 10^{21}$ soit 4 700 milliards de milliards et dans 30 milligrammes $0,03 \times 4,7 \cdot 10^{21} = 141 \cdot 10^{18}$ ou 141 milliards de milliards d'atomes d'Iode-129.

Lorsque deux ou plusieurs atomes d'un même élément ou d'éléments différents s'associent on obtient une molécule. Par exemple, Fig. 6, la molécule d'eau est constituée d'un atome

MOLECULES



Molécule d'eau

Molécule de gaz carbonique

Fig: 6 - Quelques molécules simples. Les nuages d'électrons entourant les noyaux ne s'interpénètrent pas.

d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène, notation chimique H_2O ; la molécule du gaz carbonique est constituée par deux atomes d'oxygène et un atome de carbone associés, en abrégé CO_2 . La chimie étudie les différents corps ainsi composés par l'association d'atomes.

La cohésion de la molécule est plus faible que celle de l'atome ; en gros, elle résulte du mouvement permanent des électrons autour des noyaux. Dans la molécule d'eau par exemple, si l'électron d'un des atomes d'hydrogène fait une excursion vers le noyau d'oxygène, celui-ci ayant un électron de trop devient "négatif" et attire ce même atome d'hydrogène auquel précisément il en manque un et qui, de ce fait, est devenu "positif".

Nous venons de voir que tous les isotopes sont équivalents du point de vue chimique. En particulier les isotopes radioactifs peuvent se substituer à des isotopes stables dans la molécule et dans les cellules du corps humain et y faire des dégâts comme on le verra par la suite. Exemple de molécule radioactive : l'eau tritiée, en abrégé ${}^1_1H - {}^{16}_8O - {}^3_1H$ qui peut se substituer à l'eau ordinaire ${}^1_1H - {}^{16}_8O - {}^1_1H$.

On ne sait pas comment les molécules arrivent à se grouper pour former des cellules vivantes ; mais on sait que chaque cellule contient de 1 à 100 mille milliards d'atomes et que le corps humain est composé d'environ 10 millions de milliards de telles cellules.

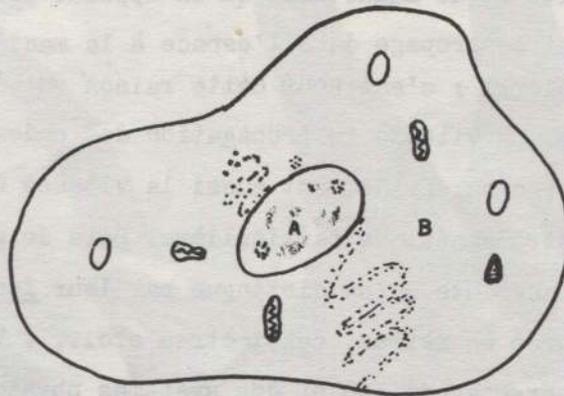
La cellule vivante du corps humain

Le corps humain est composé de différents organes, chacun d'eux formés d'un ou plusieurs types de tissus. Les tissus sont à leur tour composés de cellules. La cellule vivante est un organisme complexe contenant de nombreux éléments (voir la table p 9). Du point de vue du rayonnement qui nous intéresse ici, il nous suffira de décrire la cellule et non pas les organes.

La cellule est composée normalement d'un noyau entouré d'une membrane, le tout baignant dans un liquide, le cytoplasme, enfermé lui-même dans une seconde membrane. Quoique d'une structure très complexe, le noyau et le cytoplasme contiennent environ 70% d'eau. Le noyau, un corps ovale près du centre, est la partie vitale de la cellule. Le noyau est très actif du point de vue chimique, c'est lui qui dirige la croissance et la vie de la cellule. Le cytoplasme est une substance liquide plus ou moins incolore sécrétant les "enzymes" et s'occupant entre autres de la nourriture et des excréments de la cellule.

Beaucoup de cellules du corps humain ont une vie très courte. Pour que son action puisse se poursuivre, à un certain moment de sa vie, la cellule se dédouble : c'est la mitose. Chez l'enfant la mitose est plus fréquente que la mort des cellules de sorte que le corps croît et se développe ; chez l'adulte la mitose des cellules saines compense en gros la mort des cellules et le volume des organes reste constant. Au moment de la division

de la cellule origine des structures filiformes qu'on appelle chromosomes, apparaissent dans le noyau. Le nombre des chromosomes est fixé pour chaque espèce vivante (46 dans la cellule humaine). Dans les chromosomes, accolés les uns derrière les autres, on trouve les gènes qui déterminent les caractères héréditaires de l'individu. Lorsque la cellule se divise, les cellules formées reçoivent une copie exacte des chromosomes et des gènes de la cellule origine. Dans un processus normal, aucun changement, aucune erreur de copie n'a lieu. On appelle mutation une altération quelconque des gènes ou des chromosomes. Bien entendu, si la cellule d'un chromosome ayant subi une mutation est viable, cette transformation se retrouvera indéfiniment dans toutes les reproductions de cette cellule.



. Fig. 7 La cellule animale

- A) le noyau qui règle la croissance et la reproduction de la cellule
- B) le cytoplasme qui possède les moyens pour exécuter les ordres envoyés par le noyau.

Le développement des organes et de tout le corps humain s'effectue à partir d'une seule cellule formée par la réunion de deux cellules (appelées gamètes) provenant l'une de l'homme (spermatozoïde), l'autre de la femme (ovule). Cette cellule subit rapidement un grand nombre de divisions et, au début, toutes les cellules se ressemblent. Puis les cellules se différencient pour accomplir différentes fonctions spécialisées dans le corps humain. On distinguera ici la fonction génétique, domaine des cellules reproductrices (les gamètes mâles et femelles) et la fonction somatique, domaine de toutes les autres cellules.

Bien entendu, toute atteinte aux cellules reproductrices peut être transmise aux descendants tandis que les atteintes aux cellules somatiques ne concernent que l'individu lui-même.

Les cellules peuvent être endommagées de diverses manières et les effets sont évidemment les mêmes quel que soit l'agent qui a provoqué le dommage. Le rayonnement peut endommager la cellule, mais des actions physiques ou chimiques peuvent avoir le même effet parce que la réponse du corps humain est la même à un effet donné quel que soit la cause qui a provoqué cet effet.

II - LE RAYONNEMENT

Tout le monde a vu un rayon lumineux ou senti près de sa joue la chaleur d'un fer à repasser. Dans le premier cas le rayonnement est visible, l'ensemble du rayonnement visible est représenté dans l'arc-en-ciel : du rouge au violet. Dans le second cas, le rayonnement est invisible, mais nos sens suppléent à notre vue, on l'appelle parfois rayonnement infrarouge ou thermique. Dans les deux cas, il s'agit de la propagation dans l'espace d'une énergie, combinaison d'électricité et de magnétisme qu'on appelle plus généralement rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement se propage dans l'espace à la manière des ondes à la surface de l'eau où vient de choir une pierre ; c'est pour cette raison qu'on dit indistinctement onde ou rayonnement électromagnétique. La vitesse de propagation des ondes électromagnétiques est énorme : 300 000 km par seconde ; c'est évidemment aussi la vitesse de propagation de la lumière qui n'est qu'une onde électromagnétique particulière. Hors de portée de nos sens, il y a une gamme très étendue de rayonnements qu'on distingue par leur longueur d'onde (distance entre deux crêtes de vague) mesurée en mètres, centimètres etc... . Voici un tableau des différents types de rayonnement électromagnétique et des systèmes physiques qui sont la source de ces rayonnements.

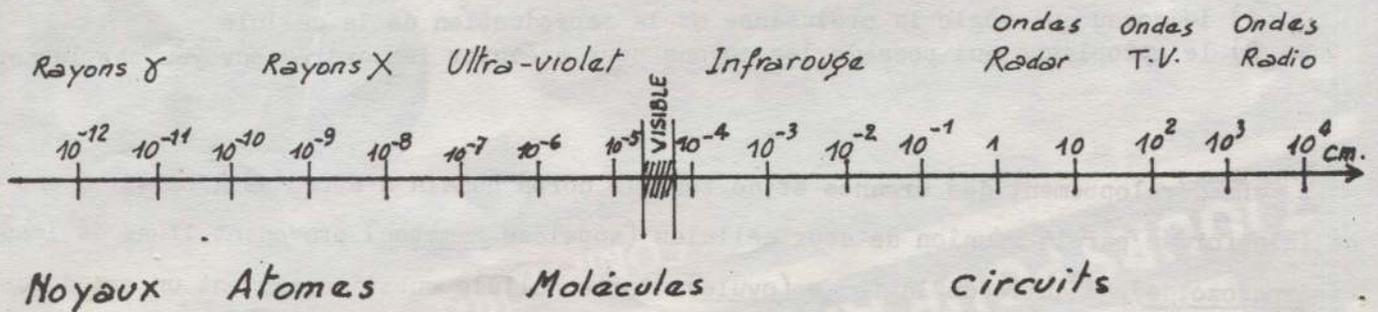


Fig. 8 Les longueurs d'ondes du rayonnement électromagnétique (attention les longueurs sont multipliées par 10^2 chaque division)

Les longueurs d'onde du rayonnement visible sont extrêmement courtes, depuis environ $4 \cdot 10^{-5}$ cm pour le violet ($4 \cdot 10^{-5}$ cm = 0,00004 cm, le quatre est à la cinquième place derrière la virgule) jusqu'à $7 \cdot 10^{-5}$ pour le rouge ; c'est à dire encore, de 40 à 70 millionièmes de centimètre. Les longueurs d'onde des ondes radio (voir le cadran d'un poste de radio) s'étendent de quelques mètres à quelques kilomètres (10^4 cm = 10 000 cm, c'est à dire 4 zéros après le 1). Il n'y a pas de séparation entre les différents types de rayonnement, pas plus

qu'entre les différentes couleurs de l'arc-en-ciel. Les propriétés du rayonnement changent : les ondes radio ne sont pas visibles, les rayons X traversent le corps humain dans les radiographies, etc ... , mais sa nature reste la même. En particulier, il peut être réfléchi ou absorbé par des moyens appropriés, comme la lumière visible le sera sur un miroir et dans le brouillard. Voyons maintenant comment le rayonnement prend son origine dans le mouvement des particules de la matière.

L'agitation extraordinaire des particules dans un corps quelconque augmente avec sa température, c'est à dire avec son énergie interne : plus sa température est élevée, plus ses particules sont agitées et plus il a emmagasiné d'énergie qu'il peut émettre sous forme de rayonnement. Vive versa, à température suffisamment basse les corps ne rayonnent plus d'énergie.

Au niveau de l'atome par exemple, l'échange d'énergie avec l'extérieur se fait surtout par rayonnement X. Lorsqu'un atome absorbe le rayonnement X, un ou plusieurs de ses électrons périphériques passent sur des orbites plus éloignées du noyau : l'atome perd de sa cohésion. Lorsque le ou les électrons retombent sur leurs orbites d'origine, le noyau réémet par rayonnement l'énergie qu'il avait absorbé et gagne en cohésion. Evidemment ce rayonnement n'est pas toujours visible, il l'est dans le cas de la fluorescence (rayonnement de lumière) et de la flamme (rayonnement de lumière et de chaleur). Notons que même pour la simple flamme d'une allumette ou d'une bougie, il y a toujours des milliards d'atomes en effervescence.

Voyons maintenant comment depuis moins 273°C , la plus basse température qu'on connaisse, jusqu'aux quelques dizaines de millions de degrés de l'intérieur du soleil, la chaleur dissocie progressivement toutes les structures. A basse température les molécules sont animées de mouvements de vibration et de rotation de faible amplitude et elles restent liées les unes aux autres ; c'est l'état solide, exemple : la glace. Lorsque la température s'élève, l'agitation des molécules augmente et l'énergie d'agitation devenant plus grande que l'énergie de liaison, elles ne se tiennent plus et glissent les unes sur les autres ; le solide se liquéfie (eau). Si la température s'élève encore, l'agitation des molécules est telle qu'elles rebondissent violemment les unes sur les autres et deviennent complètement indépendantes ; le liquide se vaporise (vapeur d'eau). La chaleur de la vapeur d'eau est déjà perceptible à distance ; c'est l'énergie qui liait les molécules entre elles qui s'échappe sous forme de rayonnement infrarouge. Il est bien évident que les températures de solidification, de liquéfaction ou de vaporisation ne sont pas les mêmes pour tous les corps et dépendent, précisément, de la structure moléculaire du corps en question. Augmentons encore la température, vers quelques milliers de degrés, l'agitation des atomes devient telle que la molécule elle-même se brise (dans la molécule d'eau, les atomes d'hydrogène se séparent de l'atome d'oxygène), la chaleur rayonnée est encore plus vive, il y a émission de rayons infrarouges et de rayons X. Vers quelques millions de degrés, les atomes à leur tour peuvent perdre tout ou partie de leurs

électrons : ils sont ionisés. En physique, un plasma est un mélange d'électrons libres et d'atomes plus ou moins ionisés, exemple : les bords du soleil. Le plasma émet des rayons X très énergiques et des électrons qu'on appelle alors rayons bêta moins (β^-). Si la température est suffisante, quelques dizaines de millions de degrés, comme à l'intérieur du soleil, l'agitation des nucléons dans le noyau devient telle qu'ils sont eux-mêmes éjectés du noyau, seuls ou en groupe : il y a désintégration du noyau. Le rayonnement électromagnétique émis alors est si énergétique qu'on lui a trouvé un autre nom : le rayonnement gamma (γ). Parmi les fragments de désintégration du noyau, outre les neutrons et les protons, on trouve souvent émis le noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$; c'est le rayonnement alpha (α).

Nous abordons ici un point délicat de la physique. On dit rayonnement (ou radiation) pour désigner soit des ondes électromagnétiques du type ondes lumineuses, soit un flux de particules comme les électrons, les noyaux d'hélium, etc... A-t-on affaire à des particules type "boules de billard" ou à des ondes type "vagues de l'océan" ou "ondes sonores" ? On sait que le son se propage par vibration de l'air et, de même, que l'eau est le support sur lequel se propage la vague. Mais quel est le support dans le cas de l'onde-particule ? Y a-t-il même besoin d'un support ? Autant de questions dont on ignore la réponse. On constate simplement que le rayonnement qu'il soit du type particule ou onde, présente indifféremment un comportement en onde ou en particule uniquement suivant la façon dont on l'observe. Le fait est que, même si ça n'est pas simple à comprendre, il y a équivalence complète entre matière et rayonnement ^(*) ; ce sont deux aspects différents d'une même chose, comme la glace et la vapeur d'eau sont aussi deux aspects différents d'un même élément. Mise à part la masse - le rayonnement électromagnétique (rayons gamma, rayons X, rayons lumineux, ondes radio, etc...) n'a pas de masse alors que les particules (électrons, protons, neutrons, etc...) en ont une - la seule chose qui distingue le rayonnement et les particules est que le rayonnement n'est jamais immobile, il se déplace toujours à la vitesse de la lumière (300 000 km par seconde), alors que les particules, tout en tournant toujours sur elles-mêmes, peuvent au contraire s'arrêter et se déplacer plus ou moins vite, mais ne peuvent jamais atteindre la vitesse de la lumière. Par ailleurs l'analogie est complète. De plus, un rayon gamma de haute énergie peut se matérialiser en un couple d'un électron normal (négatif) et d'un anti-électron (électron positif) et, vive versa, un électron et un anti-électron qui se rencontrent s'annihilent mutuellement pour donner un rayon gamma. L'analogie entre particules et rayonnement

(*) Belle leçon de modestie pour les scientifiques qui croient à la supériorité du rayonnement de l'esprit sur la matière !

est telle qu'on peut représenter schématiquement l'effet d'un écran sur la trajectoire des particules ou du rayonnement par le dessin suivant.

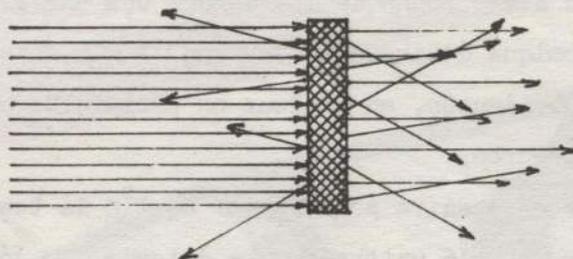


Fig. 9 Atténuation et diffusion du rayonnement électromagnétique ou corpusculaire par un écran

L'écran ne sera évidemment pas de même nature pour les différents types de rayonnement. Ce sera, par exemple, une nappe de brouillard pour la lumière des phares auto, un grillage pour les ondes radio, une plaque de plomb pour les rayons X et gamma, un mur de béton pour les neutrons, etc... Mais il y aura toujours une partie du rayonnement diffusé dans toutes les directions, y compris vers l'arrière, et une petite partie du faisceau incident traversera l'écran (s'il n'est pas trop épais⁽⁺⁾!) sans être perturbé; ce qui s'explique si on se souvient de tout l'espace vide qu'il y a dans la matière autour du noyau des atomes.

Un autre exemple qui permet d'illustrer sinon de comprendre la relation entre énergie (ou chaleur) et rayonnement est le suivant: en portant une tonne d'eau de 0°C à 100°C, nous y transférons 100 millions de calories ce qui en augmente la masse de 4 millièmes de milligramme. Cet accroissement minime de la masse est évidemment impossible à mesurer expérimentalement et elle montre la quantité énorme d'énergie emmagasinée dans quelques milligrammes de matière. Le principe de la bombe atomique est précisément de libérer cette énergie.

Enfin, le soleil et les étoiles étant des sources chaudes, il est évident que nous recevons en permanence du rayonnement du ciel: c'est le rayonnement cosmique composé de divers rayons et particules (gammas, électrons, protons, etc...) de grande énergie. Ce rayonnement est évidemment atténué dans l'atmosphère avant d'arriver au sol, néanmoins une partie de ce rayonnement est suffisamment énergique pour traverser complètement de part en part le globe terrestre. Chaque centimètre cube de notre corps est traversé en moyenne par une dizaine de particules à la minute.

(+) Il faut plusieurs centimètres de plomb pour arrêter le rayonnement gamma, plusieurs mètres de béton pour arrêter les neutrons, etc ...

Note sur la mesure de l'énergie des radiations

L'énergie est ce qui est nécessaire pour faire un travail et faire un travail consommé de l'énergie. On mesure l'énergie, le travail et la chaleur avec les mêmes unités. Le travail fourni par une personne montant une marche d'escalier est d'environ 100 joules ou 25 calories, une mouche montant sur une feuille de carton dépense une énergie d'un milliard de fois plus petite. L'explosion d'une tonne de TNT dégage une énergie d'environ 4 milliards de joules, celle de la bombe atomique d'Hiroshima environ 13 000 fois plus. Bien que toutes les formes d'énergies soient équivalentes, en chaleur on parlera de calories, en physique de joules et en électricité de wattheures.

Une calorie est la chaleur nécessaire pour élever de 1°C la température d'un cm^3 d'eau et $1 \text{ calorie} = 4,18 \text{ joules} = 0,00116 \text{ wattheure}$. La calorie, le joule et le wattheure sont des unités beaucoup trop grandes pour mesurer les énergies à l'échelle microscopique des atomes. On utilise une unité plus adaptée : l'électron-volt (eV), le kiloélectron-volt ($\text{KeV} = 1\,000 \text{ eV}$), le mégaélectron-volt ($\text{MeV} = 1\,000\,000 \text{ eV}$), etc Ainsi, un milliard de MeV ne valent que 160 millièmes de joule. Le nom électron-volt vient du fait que c'est aussi l'énergie cinétique d'un électron accéléré par une différence de potentiel de 1 volt.

A propos du rayonnement nous avons vu que les énergies augmentaient avec la température et vice versa, et que les longueurs d'onde des radiations émises devenaient de plus en plus courtes lorsque les énergies mises en jeu augmentaient. De même nous avons vu l'équivalence entre masse et énergie. Il existe donc des relations de proportionnalité entre ces différentes quantités. Ainsi, dans l'échelle des températures, à 1 eV correspond 10 000 degrés. Pour connaître l'énergie E en eV d'un rayonnement dont on connaît la longueur d'onde λ en cm, il suffit de faire la division $E_{(\text{eV})} = 0,0001/\lambda_{(\text{cm})}$. Pour connaître l'énergie emmagasinée dans 1 gramme de matière, on a la relation $1 \text{ g} = 5 \cdot 10^{26} \text{ MeV}$, ou encore l'énergie emmagasinée dans un milliardième de milligramme de matière est égale à 500 000 milliards de MeV. Quelques exemples :

L'énergie de liaison des molécules entre elles est de l'ordre de 0,1 eV, c'est pourquoi elles sont libres - détachées les unes des autres - vers $1\,000^{\circ}\text{C}$ et que les longueurs d'onde des rayonnements émis par des molécules excitées sont de l'ordre de 0,001 cm.

Les énergies de liaison des électrons dans les atomes sont de l'ordre de quelques KeV, ils sont donc libres vers $1\,000 \text{ eV} \times 10\,000 \text{ }^{\circ}\text{eV} =$ quelques millions de degrés et les longueurs d'onde des rayons X émis $\lambda_{\text{cm}} = 0,0001/1\,000 \text{ eV} = 0,000\,0001 \text{ cm} = 10^{-7} \text{ cm}$.

Les énergies de liaison des nucléons dans le noyau sont de l'ordre de quelques MeV. Les températures en jeu sont donc de l'ordre de $1\,000\,000 \text{ eV} \times 10\,000 \text{ }^{\circ}\text{eV}$ et les longueurs d'onde des rayons gamma émis $\lambda_{\text{cm}} = 0,0001/10^6 = 10^{-10} \text{ cm}$ ou 1 milliardième de millimètre.

Enfin dans le cas d'un rayonnement gamma se matérialisant en une paire électron + antiélectron, sachant que la masse de l'électron comme celle de l'antiélectron est de 500 KeV, la matérialisation ne pourra se faire que si le rayonnement gamma a une énergie d'au moins $2 \times 500 \text{ KeV} = 1\,000 \text{ KeV}$.

III - LA RADIOACTIVITE

Comment des noyaux qui, apparemment, ne sont pas chauffés, peuvent-ils être instables au point de se désintégrer ? On touche encore ici au problème non résolu des forces nucléaires . On ne peut pas assembler un nombre quelconque de neutrons et de protons, l'assemblage ne sera pas stable. Pour fabriquer du carbone ${}^6_6\text{C}^{12}$, par exemple, voir la fig. 5, il suffit d'assembler 6 neutrons et 6 protons. Avec 7 neutrons et 6 protons on obtient ${}^6_7\text{C}^{13}$ un autre isotope du carbone et cet isotope est stable. Mais avec 5 neutrons et 6 protons, on obtient ${}^6_5\text{C}^{11}$ qui est un isotope instable du carbone se transformant spontanément en bore ${}^5_6\text{B}^{11}$ par émission d'un rayon β^+ (électron positif ou anti-électron). Avec 8 neutrons et 6 protons, on obtient un autre isotope instable du carbone, ${}^6_8\text{C}^{14}$, qui se transforme en azote ${}^7_7\text{N}^{14}$ par émission d'un rayon β^- (électron ordinaire ou électron négatif). Ainsi, on constate que les noyaux radioactifs sont des noyaux qui ont "trop" de protons par rapport à leur nombre de neutrons, ou vice versa. Le noyau n'est stable (sous l'influence des forces nucléaires) que pour un certain nombre de protons et de neutrons en présence. Sinon, le noyau se transforme spontanément en expulsant (émettant) les particules superflues : c'est la radioactivité, on dit que le noyau en question est radioactif^(*). Par ailleurs, lorsqu'un noyau contient un nombre suffisant de protons, la force électrique répulsive entre les protons (de même charge électrique) devient plus grande que la force nucléaire de cohésion, ce qui fait que le nombre de noyaux réalisables est limité. Comme on peut le voir sur le graphique de la fig. 4, le dernier noyau stable est le bismuth ${}^{83}_{126}\text{Bi}^{209}$ avec 83 protons.

La désintégration des noyaux instables n'est pas toujours instantanée, il peut se passer un temps plus ou moins long avant que le noyau se désintègre. Chaque noyau radioactif a donc une certaine vie moyenne⁽⁺⁾, désignée par τ . Ainsi, le carbone ${}^6_5\text{C}^{11}$ a une vie moyenne de $\tau = 29$ minutes, ce qui signifie qu'après 29 minutes, il ne reste plus que 37% de noyaux radioactifs dans un stock initial donné, les 63% restants s'étant transformés en bore ${}^5_6\text{B}^{11}$. Et ainsi de suite, après deux vies moyennes c'est à dire 2 fois 29 = 58 minutes, il ne restera plus que 37% de noyaux radioactifs parmi les premiers 37% restants soit $0,37 \times 0,37 = 0,14$ ou 14% du stock initial^(x).

(*) On mesure la radioactivité en curies, le curie étant une quantité de matière radioactive où se produisent 37 milliards de désintégrations par seconde. Cela représente 1 g de matière dans le cas du radium-226 qui se désexcite en expulsant un noyau Hélium-4, et 7 mg dans le cas du strontium-90 qui se désexcite en émettant un électron (β^-).

(+) La période T, mentionnée précédemment, et la vie moyenne τ sont proportionnelles, $T = 0,693 \times \tau$.

(x) Pour ceux que le calcul exact intéresse, si on a N_0 noyaux radioactifs au départ, après un temps t il n'y en aura plus que $N = N_0 e^{-t/\tau}$, le reste sera désintégré.

Le carbone ${}^6_8\text{C}^{14}$ qui est continuellement formé à partir de l'azote N^{14} de l'atmosphère par les rayons cosmiques, a une vie moyenne de 8 300 ans. Avant 1954, comme on savait combien les êtres vivants en absorbaient en moyenne, il suffisait de mesurer la radioactivité correspondante des corps trouvés au cours des fouilles archéologiques pour connaître leur âge. Mais depuis 1954, la teneur de l'air en carbone C^{14} a augmenté par suite de la production de cet isotope dans les explosions thermonucléaires et l'évaluation des âges est devenue délicate sinon impossible.

Le radium Ra^{226} a une vie moyenne de 2 300 ans, l'uranium U^{238} 6,5 milliards d'années, le plutonium Pu^{239} 35 000 années ; cette longue vie moyenne est la raison pour laquelle on trouve encore de tels éléments quelques milliards d'années après la formation du globe terrestre.

Les transmutations spontanées de C^{11} en B^{11} ou de C^{14} en N^{14} s'appellent aussi réactions nucléaires. On peut provoquer artificiellement de telles réactions. Par exemple, en bombardant du carbone ${}^6_6\text{C}^{12}$ avec des noyaux d'hélium ${}^2_2\text{He}^4$, on peut obtenir des noyaux d'oxygène, ${}^8_8\text{O}^{16}$. On peut également fabriquer des noyaux d'or mais, comme pour l'oxygène, le processus n'est absolument pas rentable et hors de question tant pour enrichir la Banque de France que pour assainir l'air des villes.

Une autre réaction peut avoir lieu de façon assez inattendue, c'est la fission. Nous avons dit qu'envoyer un rayonnement sur un noyau augmentait son énergie (sa chaleur interne) ; il en est de même si on lui envoie par exemple un neutron. Cela sera d'autant plus facile que le neutron - électriquement neutre - pénètre jusqu'au noyau sans rencontrer aucune opposition. Lorsqu'un noyau d'uranium ${}^{92}_{143}\text{U}^{235}$ déjà peu stable (vie moyenne de 1 milliard d'années) absorbe un neutron, il devient l'uranium ${}^{92}_{144}\text{U}^{236}$ où l'agitation des nucléons est telle qu'elle fait éclater le noyau : c'est la fission. Dans la fission le noyau se brise en général en deux fragments assez gros plus 2 ou 3 neutrons qui partent seuls. Il y a également dégagement d'énergie (*) (200 MeV dans la fission du noyau U^{236}) sous forme de chaleur, de rayons lumineux, X, gammas, etc... Les deux ou trois neutrons émis pourront rencontrer à leur tour d'autres noyaux U^{235} dont ils provoqueront la fission et ainsi de suite. On obtient des réactions dites en "chaîne", contrôlées dans le cas des réacteurs nucléaires, et plus ou moins incontrôlées dans le cas de la bombe atomique. Dans le réacteur, le "contrôle" s'effectue en introduisant parmi les éléments d'uranium un élément (bore, graphite, cadmium, etc...) absorbant les neutrons sans donner de fission, donc les soustrayant de la "chaîne". Parmi les fragments résidus de fission, on a dénombré plus de 250 noyaux différents, certains beaucoup plus abondants que d'autres, certains stables, d'autres radioactifs.

(*) On donne souvent le poids d'uranium-235 nécessaire pour faire passer un litre d'eau de 0° à 100°C . Le calcul est simple, il faut 100 000 calories ou 418 000 joules. Sachant qu'on obtient $200 \text{ MeV} = 3,2 \cdot 10^{-11}$ joule par noyau fissionné, il faut donc fissionner $418\,000 / (3,2 \cdot 10^{-11}) = 1,3 \cdot 10^{18}$ noyaux. Sachant qu'un noyau U^{235} pèse $3,9 \cdot 10^{-19}$ milligramme, cela fait $1,3 \cdot 10^{18} \cdot 3,9 \cdot 10^{-19} = 0,5$ milligramme d'uranium-235. On donne plus rarement la radioactivité de ces 0,5 mg de déchets de fission : 4 curies, nous en reparlerons plus loin.

Une centrale nucléaire fonctionne théoriquement de la même manière qu'une centrale au charbon : le combustible "charbon" étant remplacé par le matériau fissile. On utilise en général du dioxyde d'uranium UO_2 , où l'uranium est soit de l'uranium ordinaire^(*), soit de l'uranium naturel enrichi (2 à 3%) en U^{235} . Dans le cas des réacteurs à eau bouillante, figure 10, le cœur contenant le matériau fissile chauffe de l'eau et la vapeur d'eau produite est utilisée pour faire tourner la turbine d'un générateur.

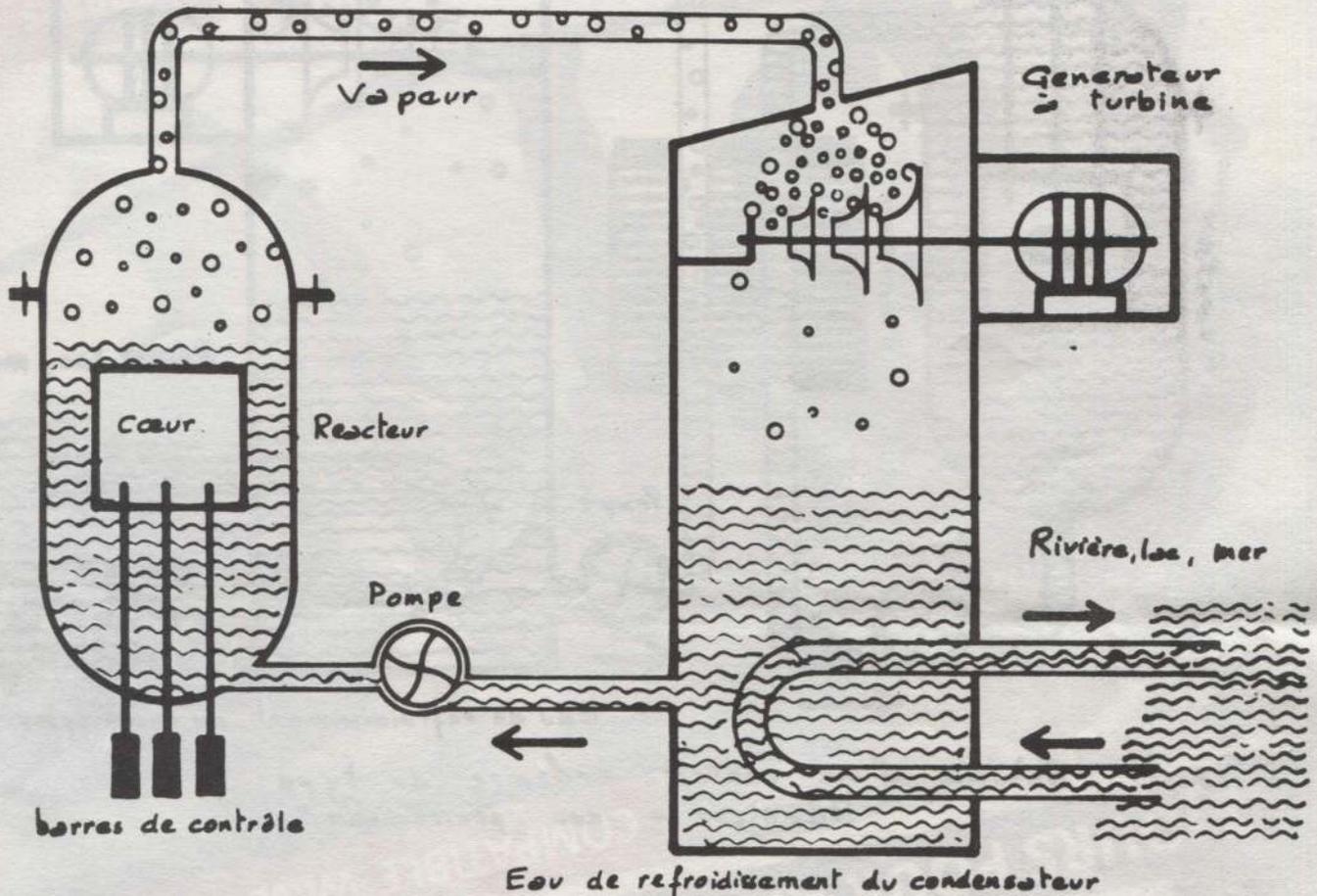


Fig.10 Schéma d'une centrale nucléaire du type "Réacteur à eau bouillante"

"La publicité présente les réacteurs nucléaires comme une affaire sans aucun risque : ce n'est pas vrai. Nous savons que les réacteurs sont dangereux et nous sommes sceptiques quant à pouvoir jamais les rendre aussi sûrs que les fabricants voudraient vous le faire croire. Il est peut être temps que la Commission de l'Energie Atomique informe le public que si les gens veulent allumer leurs lumières, ils devront s'attendre à perdre un réacteur de temps à autre et peut-être souffrir de grandes destructions ainsi que des pertes de biens."

Un Ingénieur en Chef à la Sécurité des réacteurs
Laboratoire National d'essai des réacteurs de Idaho Falls, Idaho USA
Cité par SCIENCE, Vol.177, 1er Sept 1972, p. 771

(*) L'uranium ordinaire contient 99,3% d'uranium U^{238} et 0,7% d'uranium U^{235}

Dans le cas d'un réacteur à eau pressurisée, figure 11, le coeur chauffe de l'eau qui, par l'intermédiaire d'un échangeur, fait bouillir l'eau d'un second circuit dont la vapeur va sur la turbine.

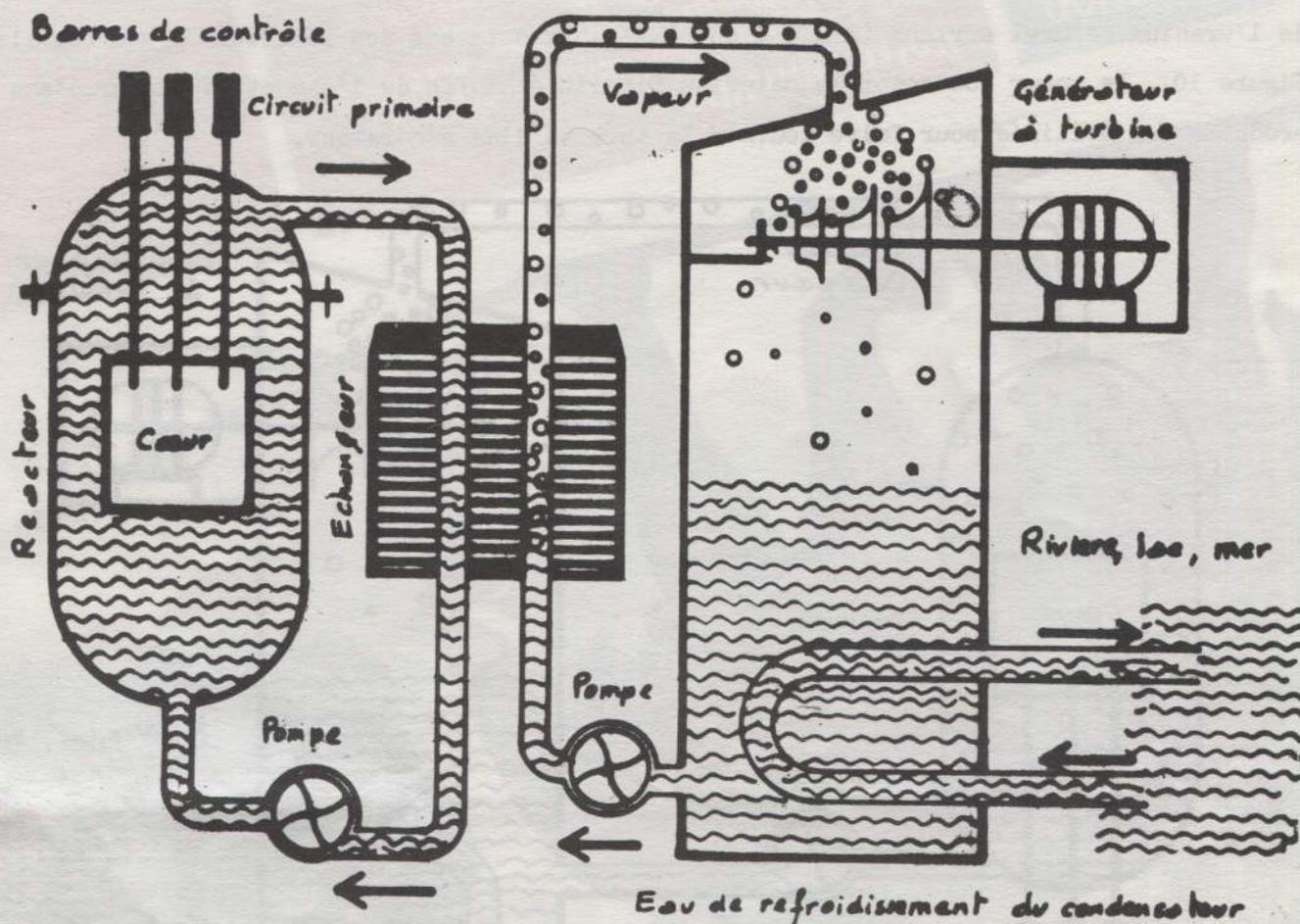


Fig. 11 Schéma d'une centrale nucléaire du type: "Réacteur à eau pressurisée"

Les réacteurs à eau bouillante sont fabriqués par Général Electric et les réacteurs à eau pressurisée par Westinghouse, deux compagnies américaines⁽⁺⁾. Ces deux types de réacteurs utilisent de l'uranium enrichi aux Etats-Unis. Ce qui permet aux tenants du nucléaire de parler très logiquement de notre "indépendance nationale du point de vue énergie".

La technologie des réacteurs, d'apparence très simple, est en fait très difficile. Il suffit de savoir que la température dans le coeur atteint couramment $2\ 300^{\circ}\text{C}$ et plus, alors qu'il existe très peu de métaux disponibles en quantité industrielle capables de supporter une telle température sans fondre. L'oxyde d'uranium est contenu dans des cylindres métalliques étanches (gaines), mais fond à $2\ 750^{\circ}\text{C}$ et libère alors les produits de fission gazeux dont la pression à l'intérieur des gaines est une des causes de leur déformation et, éventuellement, de leur rupture, contaminant ainsi toute l'eau du réacteur.

(+) Deux autres compagnies américaines Combustion Engineering et Babcock & Wilcox sont également en piste.

Les réacteurs surgénérateurs

De nombreux pays, dont la France, étudient⁽⁺⁾ un réacteur "surgénérateur", ainsi appelé parce qu'il produit plus de plutonium Pu^{239} qu'il n'en consomme. On dit aussi réacteur "à neutrons rapides". Dans les réacteurs précédents les neutrons de fission sont ralentis dans un matériau (graphite par exemple) dit "modérateur", alternant avec les cylindres d'uranium, pour augmenter le rendement du combustible parce que les neutrons ralentis ont une plus grande probabilité de provoquer une nouvelle fission. Dans les surgénérateurs, pas de modérateur, mais un coeur de petite dimension, dix fois plus petit que celui d'un réacteur à uranium naturel, contenant de l'uranium (sous forme UO_2) et/ou du plutonium (PuO_2) enrichis. Pour entretenir la réaction, compte tenu de la densité de ce coeur, il n'est pas nécessaire de ralentir les neutrons, très abondants au sein d'une masse de noyaux presque tous fissiles, d'où l'expression "à neutrons rapides".

Il faut environ 1000 kg de plutonium dans le coeur d'un réacteur surgénérateur de 1000 MW. L'investissement en matière fissile est très onéreux ; il faut extraire le maximum de la puissance thermique dégagée, dont la densité est très élevée : de l'ordre de 1 kilowatt par cm^3 de coeur. En présence d'une source de chaleur aussi intense, il n'est pas possible d'utiliser l'eau pour transporter la chaleur. On utilise le sodium en fusion.

Les difficultés technologiques de ce type de réacteur sont beaucoup plus grandes que celles qu'on rencontre autour des précédents. La résistance mécanique des cylindres scellés contenant le combustible nucléaire est mise à plus rude épreuve par la température et le flux de neutrons beaucoup plus intense. Quant au sodium fondu, il s'enflamme spontanément à l'air et doit être maintenu dans un circuit étanche.

Dans les deux types de réacteurs décrits précédemment, le problème principal est : "Comment faire pour que la réaction en chaîne ne s'arrête pas ?". Dans le réacteur surgénérateur, le problème est l'inverse : "Comment faire pour que le réacteur ne s'emballe pas ?". Outre les rejets habituels de déchets radioactifs (voir plus loin), le réacteur surgénérateur fonctionne beaucoup plus près des limites de la réaction en chaîne incontrôlé (de la bombe !) que ne le font les réacteurs précédents. En revanche, ils fournissent beaucoup plus de plutonium qu'ils n'en consomment. Non seulement les militaires en auront à profusion, mais l'abondance même du plutonium produit devient un danger. Il y avait déjà 7000 kg de plutonium fabriqués en 1970, on s'attend à 100 000 kg de plutonium produits avant l'an 2000, et un millionième de gramme suffit à provoquer le cancer des poumons sur les animaux de laboratoire. Le temps que l'activité d'un stock donné de plutonium-239 ait diminué de moitié est de 24 400 ans.

(+) L'EDF a décidé de construire une centrale équipée d'un réacteur surgénérateur de 1200 MW. Elle sera construite dans l'Ain, région de Bugey, entre Belley et St-Vulbas, sur le Rhône. Les compagnies allemande RWE et italienne ENEL sont associées au projet. La société Babcock vient de terminer en 1972, en collaboration avec le CEA et l'EDF, un réacteur surgénérateur fournissant non pas de l'électricité mais de la vapeur, prototype pour le chauffage urbain direct.

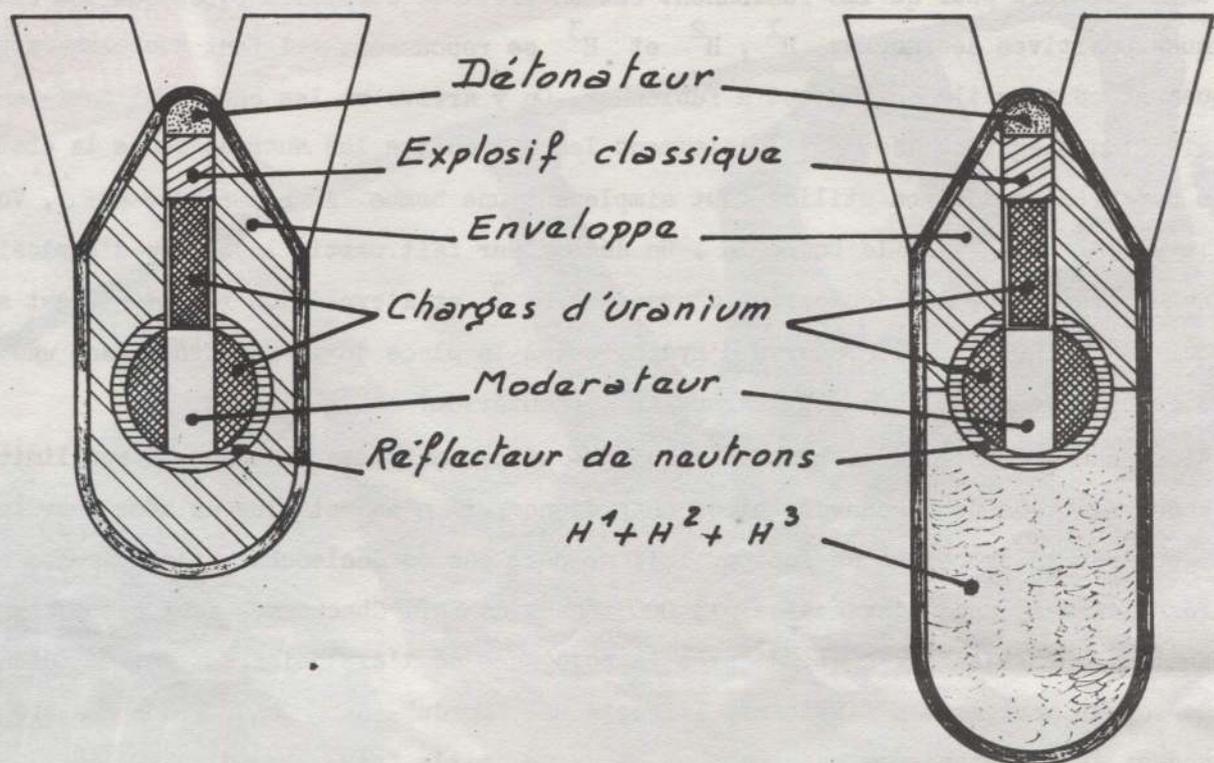
La bombe atomique

A seule fin de satisfaire la curiosité du lecteur, l'auteur est allé dérober à l'ennemi héréditaire le plan de la bombe A que nos amis ne voulaient évidemment pas vous confier.

On vient de voir dans le paragraphe précédent que la fission spontanée de l'uranium U^{236} permet de récupérer de deux à trois neutrons. Où trouver le neutron pour bombarder le premier noyau U^{235} ? Tout simplement dans la masse d'uranium U^{235} elle-même. En effet, l'uranium U^{235} se fissionne lui aussi, spontanément, en émettant quelques neutrons. Si le morceau d'uranium est sous forme de tôle, les neutrons émis se perdent dans l'atmosphère de part et d'autre de la tôle. Si la tôle est roulée ou si on a affaire à un bloc compact d'uranium, les neutrons émis ne vont pas se perdre (sauf évidemment ceux qui sont émis à la surface du bloc et vers l'extérieur) et vont aller transformer d'autres noyaux U^{235} en U^{236} qui vont fissionner à leur tour avec émission de 2 ou 3 neutrons et ainsi de suite. La masse du bloc d'uranium à partir de laquelle le nombre de neutrons stoppés dans la masse et capturés par des noyaux U^{235} est plus grand que le nombre de noyaux U^{236} qui fissionnent s'appelle la masse critique (*) puisque c'est à partir de cette masse que la réaction en chaîne démarre. Il suffit donc de rassembler la masse critique nécessaire pour obtenir l'explosion. On peut utiliser soit de l'uranium U^{235} comme à Hiroshima, soit du plutonium Pu^{239} comme à Nagasaki et dans les bombes françaises du Sahara, soit un mélange des deux. Le schéma du dispositif est indiqué sur la figure 12. En temps normal, les deux blocs sous-critiques sont maintenus à distance. L'un est cylindrique, l'autre sphérique avec un logement cylindrique au centre rempli d'un absorbant à neutrons comme le graphite. Au moment voulu pour l'explosion, une charge d'explosif ordinaire éclate et fait pénétrer le cylindre d'uranium à la place du graphite réalisant ainsi un bloc d'uranium de masse supérieure à la masse critique. La fission en chaîne démarre, l'explosion est immédiate (moins d'un millième de seconde). Une bombe ordinaire atteint l'efficacité maximum si son enveloppe tient le coup jusqu'à ce que tout l'explosif ait brûlé et que les gaz produits aient le maximum de pression à l'intérieur. Il en est presque de même pour la bombe atomique. L'astuce est de faire en sorte que le plus grand nombre possible de noyaux éclatent (ou fissionnent !) de manière à dégager le maximum d'énergie destructrice. Pour cela, il faut maintenir la masse sur-critique d'uranium (ou de plutonium) en un bloc compact le plus longtemps possible. En fait, comme il n'est pas question de retenir longtemps l'explosion, on veut simplement que les neutrons émis dans les premières fissions ne se perdent pas hors du bloc. Pour cela,

(*) La masse critique varie avec le matériau considéré, sa pureté et la forme du bloc. Dans le cas d'un bloc compact plus ou moins sphérique, elle est de 20 tonnes pour l'uranium naturel, de 11 kg pour l'uranium-235 pur à 90% et de 5 kg pour le plutonium-239 pur à 95%.

On entoure le bloc d'uranium (ou de plutonium) d'un matériau comme le bismuth réfléchissant bien ces neutrons. En souhaitant évidemment qu'une grande partie des neutrons émis vers l'extérieur sera réfléchi vers l'intérieur du bloc et provoquera d'autres fissions. Mais, finalement, le rendement n'est pas à la mesure des efforts désintéressés de nos grands savants (voir plus loin).



Bombe A

Bombe H

Fig: 12 Schéma des bombes A et H.

"Le maintien des essais de la bombe, effectués sous le contrôle des personnalités scientifiques les plus sérieuses et les plus compétentes qui soient, ne met pas en péril la santé de l'humanité."

Eisenhower (1956)

Campagne commerciale "Atomes pour la Paix"

"Les poisons radioactifs des retombées commencent à menacer la sécurité de l'homme dans le monde entier et constituent un danger grandissant pour la santé de chaque enfant à naître."

Johnson (1964)

Campagne préélectorale, après avoir signé le traité d'arrêt des essais nucléaires avec l'URSS.

Sur ma lancée j'ai également dérobé les plans de la bombe H ; mais, avant de vous en dévoiler le secret, deux mots sur la fusion. On a vu qu'un noyau trop gros a tendance à se briser (fissionner) et qu'il libère alors de l'énergie. Les petits noyaux H^1 , H^2 , H^3 ou autres ont la nostalgie inverse, ils peuvent se "grouper" ou fusionner en libérant, à poids égal deux à trois fois plus d'énergie que des noyaux qui fissionnent. Les amener suffisamment près l'un de l'autre pour qu'ils fusionnent est un problème difficile parce que les charges électriques positives des noyaux H^1 , H^2 et H^3 se repoussent ; il faut donc les rapprocher énergiquement pour qu'ils consentent à fusionner. On y arrive en les chauffant fortement afin que l'agitation thermique les jette violemment les uns contre les autres. Comme la chaleur nécessaire est très grande, on utilise tout simplement une bombe A comme détonateur. Voici également le schéma (Secret!) de la bombe H. Un détonateur fait partir la charge d'explosif classique qui rapproche les deux blocs d'uranium U^{235} et l'explosion résultante est suffisante pour faire fusionner la réserve d'hydrogène. A la place de l'hydrogène, dans une autre recette, on utilise un mélange d'hydrogène H^2 (deutérium) et de lithium.

Alors que la masse de la bombe à fission - et par suite sa puissance - est limitée par la masse critique de chacun des blocs en présence, il n'en est plus de même pour la bombe à fusion puisque le processus de fusion, lui, ne peut pas se déclencher spontanément. La bombe d'Hiroshima avait une puissance de 13 000 tonnes de TNT. Chacun des deux blocs d'uranium U^{235} pesait une douzaine de kg et, d'après la puissance de l'explosion, on estime qu'un kilogramme de noyaux seulement a fissionné, le reste est "perdu". Cependant, grâce aux progrès de la science et de la technique, une bombe H moderne, mille fois plus puissante que la bombe d'Hiroshima, ne requiert que 143 kg d'hydrogène H^3 (ou tritium).

Comme on ne dira rien par la suite des effets directs de la bombe, on peut citer ici quelques chiffres afin de satisfaire la curiosité du contribuable anxieux de savoir si ses impôts sont bien utilisés. Avec une petite (*) bombe H de 10 mégatonnes (10 millions de tonnes) de TNT, c'est à dire à peu près mille fois la bombe d'Hiroshima, au centre de Paris par exemple, tout Paris est vitrifié pour la postérité telle une Pompéi moderne, jusqu'à 20 km à la ronde tout est écrasé par la déflagration, jusqu'à 40 km les brûlures sont mortelles pour les gens non protégés, jusqu'à 75 km les brûlures sont graves et, bien entendu, des incendies se déclarent jusqu'à 100 km de là. Il n'est pas nécessaire de citer ici, comme dans le cas des bombes A, le danger encouru au voisinage de l'explosion par la radioactivité parce que la portée incendiaire de la bombe H est bien plus grande que la portée des radiations mortelles de la bombe A lui servant de détonateur. La bombe H est essentiellement une bombe incendiaire. Nous verrons plus loin les produits radioactifs dégagés dans l'atmosphère.

(*) Je dis "petite" parce que Khrouchtchev se vantait déjà d'une bombe de 100 mégatonnes.

Le prix de la dissuasion

(d'après New Scientist du 6.8.70, p 282, les prix sont convertis en F à raison de 5 F le dollar)

Le Plutonium-239. Des déchets d'un réacteur de 500 MW, on peut extraire annuellement 160 kg de Plutonium-239 suffisamment enrichi pour faire 20 bombes de 20 kilotonnes. Coût initial 435 millions de F, plus 50 millions de F par an pour le fonctionnement.

l'Uranium-235. L'Uranium-235 doit être extrait de l'uranium naturel par raffinage. Une usine de dimension rentable coûte entre 4 et 5 milliards de F (l'usine française de Pierrelatte a coûté plus de 6 milliards). Le coût annuel de fonctionnement est de l'ordre de 2 milliards de F. L'uranium revient donc à environ 60 000 F le kg. Il faut 25 kg d'Uranium-235 pour faire une bombe de 20 kilotonnes, soit donc 1 500 000 F d'Uranium-235 par bombe.

La mise en oeuvre. L'usine d'assemblage, les essais nécessaires pour la fabrication de 10 bombes par an coûtent environ 95 millions de F par an. L'expédition des bombes coûte ce que coûtent les bombardiers, les fusées de portée intermédiaire ou les sous-marins et leur entretien^(*). A ce jour (1970) le système de défense français revient à 45 milliards de F. Pour produire et déployer une force nucléaire de 50 missiles en 10 ans, il faut compter jusqu'à 19 000 personnes dont 5 000 savants et ingénieurs.

"Notre force de dissuasion est dépourvue de crédibilité."

Général Jousse. Le Monde 13 Fev 70.

"Sachez, et vous le savez, que la seule grande puissance visée par nos moyens nucléaires pourrait les faire disparaître quand et comme elle le voudrait."

Général Stehlin, député,
Discours à l'Assemblée Nationale Nov 71.

Antimilitariste, je n'aime pas les généraux fussent-ils comme ceux-ci. J'aime mieux la calme détermination de Germaine Greer dans "La Femme Eunuque", pages 389, 390.

"J'ai vécu à plusieurs reprises avec des hommes réputés brutaux dont deux avaient été condamnés pour coups et blessures, sans qu'ils m'aient jamais menacée physiquement, tellement il était évident que je ne me laisserais pas impressionner ... Si les militaires étaient assurés d'être exclus du lit des femmes, comme Lysistrata l'avait proposé, la guerre aurait beaucoup moins de prestige."

(*) Les mirages IV de la force de dissuasion française emportent une bombe de 60 kilotonnes. Chaque Mirage IV coûte 25 millions de F en 1972, plus à peu près autant durant la vie de l'appareil en pièces de rechange et entretien. Les sous-marins atomiques coûtent autour de 100 millions de F, même prix que le Concorde. Ceci ne représente évidemment que le coût de fabrication, la mise au point coûte beaucoup plus cher et n'est pas révélée en général. A titre de comparaison, Claude Julien signale dans "Le suicide des démocraties" que le budget de la Justice en France est inférieur au prix d'un seul avion de combat.

Conclusion machiavélique

Supposons un instant, à titre d'hypothèse purement théorique, que nous ayons besoin d'une force de dissuasion ⁽⁺⁾. Je prétends alors qu'on peut - soit par lancé de ballons plastiques invisible aux radars, soit par des saboteurs demeurant sur place, soit encore par des dispositifs automatiques cachés dans le pays et commandés par radio - porter chez n'importe quel ennemi une riposte bactériologique absolument imparable et d'un coût ridiculement petit comparé au coût des bombes A ou H, de leur système de transport et des moyens colossaux qu'on met en oeuvre pour essayer de se protéger de l'attaquant. L'ensemble de la "Défense Nationale" dissuasive pourrait être assuré et entretenu par à peine un millier d'hommes.

Alors ? Conclusion ? L'ensemble des industries de guerre, et la nôtre en particulier, n'est qu'un autre exemple de l'activité parfaitement inutile à la société, mais nécessaire aux gouvernants pour empêcher les gens de s'interroger - comme Sisyphe - sur la finalité de leur existence. Marcuse calcule ^(x) qu'en supprimant le travail inutile, il suffirait que ceux qui travaillent actuellement, limitent leur effort à 2 heures par jour ; mais nous devons être là, rivés à notre place 8 heures par jour comme les gosses à l'école, pour ne pas gêner les "grands". Ainsi nous n'aurons jamais le temps de penser à réorganiser la société.

(+) Ce n'est pas l'avis de l'auteur

(x) Dans "Vers la Libération".

IV - EFFETS DU RAYONNEMENT DANS LA MATIERE

On a vu à propos de la figure 9 que le rayonnement est affaibli lorsqu'il traverse un écran, tant en ce qui concerne le nombre des particules sortantes que leur énergie. Le mécanisme de cet affaiblissement est très simple, la particule incidente perd une partie de son énergie à chaque collision (on dit aussi interaction) avec les particules de l'écran qu'elle rencontre sur sa trajectoire. Comme il y a beaucoup plus d'électrons que de noyaux et que, par ailleurs, les noyaux sont très compacts, le ralentissement des particules se fait surtout par interaction avec les électrons atomiques qui se trouvent expulsés vers des orbites supérieures ou arrachés de l'atome. Dans le premier cas nous avons vu que l'atome ou la molécule était simplement excité, dans le second cas il est ionisé. Dans certains cas, on peut même photographier la trajectoire de la particule incidente grâce aux perturbations qu'elle y a semées. Sachant que la création d'un ion (atome ou molécule ionisé) requiert une énergie d'environ 20 eV, il est facile de calculer le nombre d'ions formés sur la trajectoire d'une particule de 1 MeV d'énergie initiale jusqu'au moment où elle s'arrête, c'est $1\ 000\ 000\ \text{eV} / 20\ \text{eV/ion} = 50\ 000\ \text{ions}$.

Dans le cas de solides, la perte des électrons par les atomes est sans importance parce qu'ils arrivent toujours à en récupérer d'autres. Mais il arrive aussi que les atomes soient "bousculés" et changent de place. De même, lorsqu'un proton, un neutron ou autre sont stoppés dans un métal et surtout dans un cristal où tous les atomes sont disposés géométriquement, l'ordre est rompu par l'établissement d'un atome mal placé ou d'un atome étranger, le milieu se disloque et perd ses qualités : les cristaux perdent leur brillant, les métaux deviennent comme écrouis, etc ...

Dans le cas de gaz ou de liquides, prenons par exemple l'eau qui forme une grande partie de notre corps, que se passe-t-il le long de la trajectoire du projectile ? La molécule d'eau H_2O qui tient assemblée par une énergie de l'ordre de 0,1 eV est brisée lorsqu'elle reçoit une énergie de 20 eV et ce, en H et OH. Après quoi, par diverses combinaisons chimiques successives, il y a formation d'hydrogène, d'oxygène et d'eau oxygénée.

Effets des radiations dans les organismes vivants

Quels sont les effets de ces radiations sur l'être humain ? Tout d'abord ces effets sont étudiés depuis très longtemps. Déjà, vers 1900, Becquerel qui découvrit la radioactivité, avait remarqué une brûlure sur sa peau au niveau de sa poche de gilet, là où il conservait un tube de radium. Depuis, on a pu étudier les effets du rayonnement sur : a) les survivants d'Hiroshima et de Nagasaki (étude de la Commission Américo-Japonaise "ABCC" - Atomic Bomb Casualty Commission), b) des patients traités par rayonnements pour des maladies non cancéreuses, c) les mineurs des mines d'uranium, d) les accidentés des laboratoires et usines où sont manipulés des produits radioactifs, e) les animaux de laboratoire, etc ...

Dans le cas des organismes vivants, il y a évidemment d'autres types de molécules qui peuvent être également disloquées et se recombinaison au hasard pour composer d'autres molécules complètement différentes. Les tissus et les organes vivants sont composés de cellules, elles-mêmes formées de molécules ; c'est donc au niveau des cellules que se produiront les transformations. Mais les cellules des organismes vivants ont une caractéristique particulière extrêmement importante du point de vue rayonnement : elles se reproduisent constamment. Par suite, l'effet biologique (c'est à dire sur les êtres vivants) des radiations va se subdiviser en deux parties suivant qu'on examine les effets immédiats ou les effets à plus long terme dus à la régénération continuelle des cellules.

Dans la plupart des cas, les lésions dues aux radiations sont mortelles pour la cellule qui disparaît comme disparaissent les cellules de la peau brûlée par le soleil par exemple. Il est bien évident que si le nombre de cellules détruites est suffisamment faible, l'organe régénère ses cellules et il y a guérison ; si ce nombre est trop important, l'organe meurt. Bien entendu, dans le cas d'un organe vital, de deux choses l'une : ou il peut être transplanté par greffe, ou l'individu meurt.

Par ailleurs, certaines transformations moléculaires ne sont pas mortelles pour la cellule. En effet, sans qu'on sache très bien comment le phénomène se produit, on sait qu'une certaine dose de radiations provoque le cancer. On sait simplement que, au hasard, une cellule devient "anormale" et se met à proliférer. On ne fait donc pas une grosse erreur en disant que certaines transformations induites par les radiations ne sont pas mortelles pour la cellule qui, simplement, devient cancéreuse. De même, nous savons que l'être humain se développe à partir d'un oeuf composé d'un spermatozoïde et d'un ovule. Cet oeuf va se diviser en plusieurs cellules. Qu'une de ces cellules soit modifiée, il est clair que, si elle ne meurt pas, une partie importante de l'individu à naître peut être déformée. Dans le cas de cellules génétiques, que la tare ainsi développée soit visible ou non, si l'individu naît viable, il peut la transmettre à ses descendants. Considérons les molécules d'ARN ou d'ADN qui transmettent le message protéique ou génétique d'une génération à l'autre des cellules vivantes et dans laquelle on trouve, entre autre, de l'hydrogène H^1 , du carbone C^{12} et du phosphore P^{31} . Au moment de la formation de la molécule, l'un ou l'autre de ces trois atomes peut être remplacé respectivement par le tritium H^3 , le carbone C^{14} et le phosphore P^{32} qui sont radioactifs et chimiquement identiques aux précédents, lorsqu'un de ces trois atomes se désexcite, non seulement il émet un rayonnement destructeur, mais il se transforme (ou "transmute") en hélium He^3 , azote N^{14} et soufre S^{32} respectivement. Il est bien évident alors que le "message" transmis est faux, affectant les cellules correspondantes.

La fin de ce paragraphe est consacrée à l'étude un peu plus détaillée des effets du rayonnement sur l'homme.

Les radiations traversant les cellules vivantes ionisent ou excitent les atomes et les molécules de la cellule. Ces perturbations affectent les forces qui lient les atomes et les molécules entre eux. Si la molécule se brise, les fragments - qu'on appelle ions ou radicaux - seront chargés électriquement et ne seront pas chimiquement stables. Outre la destruction même de la molécule considérée, d'autres effets nocifs seront produits par l'interaction de ces radicaux et ions avec les autres constituants de la cellule. L'importance relative de ces différents effets dans la lésion de la cellule n'est pas encore connue (1972). Parmi les dommages occasionnés à la cellule ceux relatifs au noyau sont les plus dangereux, mais des lésions du cytoplasme peuvent également provoquer de sérieux dommages à la cellule.

L'effet total sur le fonctionnement de la cellule dépend de la dose de rayonnement reçue. Le fonctionnement de la cellule peut être affecté à différents niveaux jusque y compris la mort de la cellule. Certains dégâts peuvent être réparés. Ceci se fait par l'action de la cellule elle-même ou par le remplacement des cellules fortement endommagées dans un tissu donné par mitose des cellules saines.

Un grand nombre de travaux théoriques ont été faits pour découvrir une dose seuil en dessous de laquelle il n'y aurait aucun effet observable^(*). Le problème est compliqué par le fait que nous sommes tous déjà soumis à la radioactivité naturelle laquelle, d'après Linus Pauling (Bull. of the Am. Scientist, Sept 1970), est la cause d'environ 10% des mutations génétiques à l'origine des malformations congénitales physiques ou mentales. Par suite, on devrait toujours supposer que, quelle que soit la dose reçue, elle produira des effets biologiques.

Les différentes cellules du corps humain n'ont pas la même sensibilité au rayonnement. Les plus sensibles sont celles qui se reproduisent le plus souvent et celles qui sont le siège d'une plus grande activité chimique. En outre, certaines phases de la mitose sont plus sensibles que d'autres et les cellules jeunes sont plus affectées que les cellules adultes. La moelle des os, les tissus lymphoïdes (des ganglions, de la rate, etc ...) et les organes génitaux sont parmi les plus sensibles. Les muscles et les cellules des os sont les moins radiosensibles.

Les effets biologiques des rayonnements sont donc classés en deux catégories : les effets somatiques immédiats ou retardés, relatifs à l'individu irradié lui-même, et les effets génétiques relatifs aux cellules reproductrices qui ont un caractère héréditaire. Les effets somatiques immédiats. Les effets somatiques sur l'homme ou sur les animaux peuvent être décrits soit en référence à une irradiation totale ou partielle du corps, soit en référé-

(*) Ceci pour apaiser les craintes du public devant l'augmentation des rayonnements reçus dus à la pollution radioactive du globe.

rence à l'irradiation d'un organe particulier. Du fait de l'importance de certains organes dans le corps, leur lésion peut évidemment induire des effets dans les autres organes.

Différents facteurs physiques interviennent pour la détermination des effets somatiques :

- La nature du rayonnement, certaines radiations sont plus dangereuses que d'autres.
- La dose absorbée, les dégâts sont proportionnels à la dose reçue.
- La durée de l'irradiation : une certaine dose peut être mortelle si elle est reçue en un temps très court et non mortelle si elle est étalée dans le temps.
- La distribution de la dose dans le corps : irradiation totale ou d'un seul organe.
- L'âge de la personne irradiée : les enfants sont plus sensibles aux radiations que les adultes.

Voici les effets somatiques sur quelques organes et tissus du corps.

sang et moelle osseuse : Les globules rouges alimentent les cellules en nourriture et en oxygène et enlèvent les déchets, ils sont formés dans la moelle rouge des os. Les globules blancs combattent les infections et sont formés dans les ganglions, la rate, etc Les globules blancs sont les premiers affectés par le rayonnement, leur nombre diminue (leucopénie) et la résistance du corps à l'infection diminue. Si l'irradiation est suffisante, après quelques semaines les globules rouges diminuent (anémie) entraînant une faiblesse générale de la personne irradiée. Un autre composant du sang : les plaquettes sanguines diminuent également dans la semaine qui suit, perturbant la coagulation du sang : les plaies ne se ferment plus. Si l'irradiation n'est pas importante, la moelle produira de nouvelles cellules pour remplacer celles qui ont été détruites, dans le cas contraire les effets peuvent être permanents.

Système lymphatique. La lymphe est un liquide incolore baignant les tissus et servant d'intermédiaire entre le sang et les cellules, elle est drainée dans les vaisseaux vers des glandes, comme la rate, qui filtrent les déchets ramassés. Ce sont ces glandes qui montrent les premiers signes d'hémorragie et d'infection après irradiation.

Le tube digestif. Les cellules du tube digestif secrètent des substances qui transforment la nourriture de manière qu'elle puisse passer dans le sang. Les symptômes d'une lésion du tube digestif sont des nausées et des vomissements. Les cellules du tube digestif se détachent, encombre l'intestin, et le tissu mis à nu peut être le siège d'ulcères. Dans les cas d'irradiations importantes, l'infection, le manque d'absorption de nourriture et la déshydratation par la diarrhée entraînent la mort.

Les organes génitaux. L'irradiation des organes génitaux source des cellules reproductrices (gamètes mâles ou femelles) peut avoir des effets somatiques et des effets héréditaires. La stérilité est obtenue au delà d'une irradiation de 150 rem (voir plus loin cette unité). Les cellules reproductrices qui survivent aux lésions peuvent transmettre toute mutation génétique provoquée par l'irradiation. Aussi, l'effet global de l'irradiation des glandes sexuelles (testicules et ovaires) peut ne pas être apparent avant plusieurs générations.

Le système nerveux. Il est composé du cerveau, de la moelle épinière et des nerfs périphériques coordonnant l'activité du corps. La moelle épinière et les nerfs sont très résistants aux radiations, mais le cerveau est beaucoup plus sensible qu'on croit habituellement. Le rayonnement affecte tout d'abord la fonction du cerveau et si l'irradiation est suffisante les lésions peuvent avoir lieu directement ou par défaut d'arrivée du sang.

La glande thyroïde. C'est une glande située à la base du cou sécrétant une hormone (la thyroxine) qui contrôle le métabolisme basal et a des répercussions sur les glandes surrénales et l'hypophyse. La thyroxine contient environ 65% d'iode, elle est essentielle à la croissance et au développement. La thyroïde est assez résistante aux radiations extérieures, mais elle peut-être sévèrement atteinte en cas d'inhalation d'iode radioactif (Iode-129, 131). Les lésions de la thyroïde provoquent une diminution de la production de thyroxine qui entraîne une réduction du métabolisme et, les tissus musculaires ne recevant plus assez d'oxygène, l'état de santé général peut être durement affecté.

Les yeux. Le cristallin des yeux est très susceptible à des lésions irréversibles par les radiations, ses cellules ne sont pas remplacées. La rétine est moins sensible. Lorsque les cellules du cristallin sont endommagées, elles perdent leur transparence. L'opacité du cristallin (cataracte) peut survenir après une certaine période de latence ; c'est donc un effet somatique à retardement. Le rayonnement provoque plus facilement la cataracte chez les jeunes que chez les personnes âgées.

Les poumons. Normalement les poumons ne sont pas trop affectés par le rayonnement extérieur. Comme dans le cas de la thyroïde, l'irradiation interne provenant de poussières ou de gaz radioactifs inhalés, est la plus dangereuse.

Le foie, la vésicule biliaire, les reins sont assez résistants aux radiations extérieures, mais sont très sensibles à l'irradiation interne. Certains isotopes radioactifs peuvent se concentrer dans le foie.

Les os. La moelle est extrêmement sensible aux radiations, tandis que les cellules et les fibres osseuses sont relativement plus résistantes. Lorsque les isotopes radioactifs, comme le strontium ou le plutonium, parviennent dans la moelle ou le tissu osseux, des lésions très importantes peuvent apparaître après un temps plus ou moins long (des années) selon la quantité absorbée.

Les effets somatiques à retardement. L'étude des effets tardifs provoqués par irradiation est assez délicat parce qu'il est difficile d'établir avec certitude une relation de cause à effet⁽⁺⁾. Les principaux effets sont les suivants :

(+) Ce qui permet d'employer du personnel mal informé dans les mines ou pour d'autres activités soumises à des irradiations moyennes et de les licencier à temps, avant la naissance de complications : l'employeur en profite, et la Sécurité Sociale (des salariés) paie les dégâts. Il aurait tort de se gêner, l'Etat avec le tabac et l'alcool montre le bon exemple.

Cancers de la peau, des poumons, des os et de la moelle osseuse (leucémie). La période de latence est de plusieurs années.

Effets sur les tissus : parmi les plus importants, on a cité la cataracte et la stérilité temporaire ou définitive.

Espérance de vie : La durée de vie est réduite par le rayonnement, mais les données sont encore assez imprécises. Le vieillissement apparaîtrait, entre autres, comme une conséquence générale des erreurs de copie dans la mitose des cellules et le rayonnement, provoquant des fautes de copie supplémentaires, accéléreraient le processus.

Croissance et développement. Les effets du rayonnement sur l'embryon dépendent non seulement de la dose mais également de l'âge de l'embryon : plus il est jeune, plus les lésions sont importantes. Les lésions cellulaires du fœtus sont les plus graves puisque la moindre atteinte peut s'amplifier en une anomalie majeure au cours de son développement.

Les effets héréditaires. Il s'agit de voir ici quels sont les traits susceptibles d'être transmis de génération en génération. Ce sont les gènes qui transmettent les caractères héréditaires. Donc toute modification ou mutation d'un gène qui est généralement assez stable, peut altérer le caractère transmis. Les radiations peuvent provoquer de telles mutations, ainsi d'ailleurs que d'autres agents (DDT, Thalidomide, Ypérite, etc...). Le fait que d'autres causes que les radiations provoquent des mutations, complique énormément le problème. On ne peut donc pas affirmer que telle mutation particulière a été induite par rayonnement. En revanche, connaissant le taux moyen de mutations "naturelles" dans une population, il est très facile de constater une augmentation de cette moyenne lorsqu'on irradie une population identique. Il est évident que de telles expériences, nécessitant l'étude des sujets irradiés sur plusieurs générations n'a pas encore pu être faites sur des êtres humains (patience ! diraient certains). En revanche elle a été faite en laboratoire sur différentes espèces animales.

" A toutes les doses et à tous les taux de doses infligées jusqu'à présent, on a pu constater des mutations génétiques dans toutes les espèces animales étudiées. On en déduit que tout accroissement du rayonnement infligé aux humains provoque une augmentation des mutations génétiques. Parfois l'extrapolation aux humains de résultats acquis sur les animaux peut-être source d'erreur. Toutefois, dans ce cas précis des radiations atomiques ou nucléaires, les effets sont suffisamment semblables pour permettre une telle affirmation^(*)".

Le gène atteint peut être "dominant" ou "récessif". Dans le premier cas les anomalies apparaissent dès la première génération. Dans le second cas l'anomalie n'apparaît que si les deux parents ont la même mutation du gène, et ceci peut ne survenir qu'après plusieurs générations.

(*) H.J. MOE et al . Rapport n° 7291 de l'Argonne National Laboratory. Mai 1972

La mesure des radiations nucléaires

Il n'est peut-être pas inutile de préciser le mode d'action des produits radioactifs et comment on mesure leur danger. Nous venons de voir que le rayonnement détruit le tissu vivant. Ce rayonnement peut provenir soit de l'extérieur si nous sommes au voisinage d'une source de rayonnement, soit de l'intérieur si nous avons absorbé le produit radioactif. A intensité égale, l'effet est évidemment le même. Le strontium Sr^{90} par exemple n'est pas un poison, au contraire, il est parfaitement assimilé par les os au même titre que le calcium. Toutefois, l'ingestion d'un millième de milligramme de Sr^{90} peut pénétrer dans le corps près de 7 000 000 de milliards d'atomes radioactifs. Chacun de ces atomes se désactive en émettant un électron de 0,5 MeV d'énergie qui a un parcours de quelques 3 mm dans le tissu le long duquel l'électron va ioniser quelques 25 000 molécules ou atomes. Comme la vie moyenne du Sr^{90} est de 40 ans, on peut calculer combien d'atomes de Sr^{90} se désactiveront chaque année et quelle sera la destruction moyenne des cellules autour de la poussière absorbée (*).

Comme on pouvait s'y attendre, on mesure le pouvoir destructeur des rayonnements par l'énergie perdue par ces rayonnements dans le tissu vivant. La dose de rayonnement reçue est égale à la quantité d'énergie cédée à un volume de matière par les particules ionisantes divisée par le poids de ce volume irradié. L'unité de dose est le rad,

1 rad = 100 ergs/gramme = 0,01 joule/kilogramme.

A énergie égale, la trajectoire des particules est plus ou moins longue selon la facilité d'interaction du projectile avec les atomes et les molécules du milieu. Par exemple, un électron de 1 MeV s'arrête dans 3,4 mm de tissu, alors qu'un noyau d'hélium (particule alpha) de 1 MeV ne parcourt pas plus de 0,0007 mm. Ceci signifie que la densité des ions sera plus grande le long de la petite trajectoire de la particule alpha. Or l'efficacité biologique, c'est à dire l'effet du rayonnement sur les fonctions cellulaires, est d'autant plus grande que la densité des ions est plus grande. Si l'on veut utiliser la même unité pour tous les types de rayonnement, il faut faire intervenir un "facteur de qualité biologique". Ce facteur est égal à 1 pour les rayons X et gammas, de 5 à 10 pour les neutrons et les protons et de 10 à 20 pour les noyaux plus lourds. Moyennant quoi, la dose reçue en "rem" est égale à la dose reçue en rad multipliée par ce facteur de qualité. Pour simplifier, on peut utiliser le rad pour le rem en négligeant le facteur de qualité. Toutes ces unités semblent assez ésothériques, mais pas plus que le mètre ou le kilogramme pour les Anglais, on s'y habitue.

(*) On sait qu'après une vie moyenne (égale ici à 40 ans), il ne reste plus que 37% du stock initial, soit $0,37 \times 7$ millions = 2,6 millions. Donc, $7 - 2,6 = 4,4$ millions de milliards d'atomes se seront désintégrés en 40 ans, soit en moyenne $4\,400\,000 / 40 = 100\,000$ milliards de désintégrations par an. C'est à dire 0,003 milliard par seconde ou $0,003 / 37 = 0,00009$ curie ou 90 microcuries. Sachant qu'à une microcurie de Sr^{90} répartie dans le corps correspond pour le squelette une dose d'environ 0,25 rad par an, on obtient ici $90 \times 0,25 = 22$ rad par an. Nous verrons plus loin les effets correspondant à une telle dose.

Ce que nous recevons

Quelques exemples nous feront mieux voir à quoi on s'expose. Cependant, du fait de la reproduction continuelle des cellules vivantes, on se souviendra qu'il n'est pas équivalent, pour un organe, de recevoir une dose importante en une seule fois ou la même dose en plusieurs irradiations échelonnées dans le temps et laissant à l'organe le temps de récupérer. Par contre, en ce qui concerne les modifications cellulaires qui ne détruisent pas la cellule (leucémies, cancers, tares héréditaires, etc...) comme les transformations en question se font au hasard, il est bien évident que le résultat ne dépend que de la dose totale reçue.

On a déjà mentionné que le soleil et les astres nous envoyaient du rayonnement : le rayonnement "cosmique", et qu'on trouvait encore sur terre des minéraux radioactifs à longue durée de vie. L'ensemble de ces rayonnements constitue ce qu'on appelle le rayonnement "naturel". D'après le Comité d'étude des effets des radiations atomiques des Nations Unies (1962), la dose moyenne est de l'ordre de 0,125 rem par an et se décompose de la manière suivante :

Rayonnement cosmique (gammas, neutrons, protons, etc ...)	0,050 rem
Rayonnement terrestre : roches, sol, air (gammas)	0,050 rem
Rayonnement interne (béta, gammas) provenant de produits absorbés avec l'air, l'eau et la nourriture	
dont : Potassium K^{40}	0,020 rem
Radium Ra^{226} et Ra^{228} , Plomb Pb^{210} , Carbone C^{14} , Radon Rn^{222}	0,005 rem

Pour fixer les idées, voici également quelques valeurs moyennes d'irradiations médicales ou autres, d'après Etherington et Morgan, Nuclear Engineering Handbook (Mc Graw Hill) page 7-37 .

Radiographie (photo) des poumons en Angleterre	0,160 rad
Radiographie (photo) des poumons aux U.S.A.	0,200 rad
Radioscopie des poumons (le radiologue observe les poumons sur un écran)	0,1 à 1 rad
Radiographie d'une dent	1,5 à 300 rad
Examen prénatal	51 rad
Radioscopie du pied pour le choix de chaussures (par exposition de 20 sec)	7 à 14 rad
Traitement des tumeurs cancéreuses	3 000 à 5 000 rad

A noter qu'il s'agit ici de valeurs mesurées et non pas de valeurs souhaitées par un minitricule quelconque de l'environnement ou de la santé.

D'après le Dr Pierre Pizon, radiologiste expert auprès des tribunaux, voici les doses reçues au cours des examens radiologiques systématiques obligatoires en France (cité par l'Association pour la Protection contre les Rayonnements Ionisants)

1 radioscopie pulmonaire en 30 secondes	5,5 rem /30 s
1 radiographie pulmonaire d'adulte	1,8 rem
1 radiophographie pulmonaire d'enfant	1,6 rem

Dans Science, vol.166, Oct 1969, p. 574, R.W. Miller résume les observations faites à ce jour sur les effets à retardement des radiations nucléaires, par la Commission Américano-Japonaise.

L'étude de 70 000 enfants conçus après les explosions n'a pas permis de révéler sans ambiguïté des effets génétiques ou cytogénétiques des radiations. Ceci, contrairement à ceux exposés aux radiations soit dans l'utérus, soit après la naissance, qui présentaient un nombre plus élevé que la moyenne d'anomalies chromosomiques complexes. Cet effet est d'ailleurs plus prononcé chez les personnes âgées de 30 ans ou plus au moment de l'explosion.

Quoiqu'une très-grande variété de malformations congénitales aient été produites expérimentalement sur les animaux par irradiation de la mère, la seule anomalie observée à ce jour sur les survivants Japonais est un tour de tête plus faible que la moyenne, associé à une déficience mentale, l'effet étant proportionnel à la dose reçue.

L'étude de la Commission ne laisse aucun doute quant à l'effet leucémique chez l'homme d'une dose de radiation suffisante. Un effet semblable a été observé en Angleterre sur des patients traités par rayonnements pour une spondylarthrite ankylosante (variété de rhumatisme). Dans les deux études, l'effet est proportionnel à la dose reçue et la leucémie se déclare surtout vers la sixième année après l'exposition aux rayonnements.

Un accroissement du nombre des cancers autres que la leucémie a été également observé parmi les survivants Japonais ayant reçu une dose de radiations de 90 rad ou plus : cancers des poumons, des seins, de la glande thyroïde. Ces résultats confirment les observations faites sur les patients traités par radiothérapie.

D'autres effets moins marqués mais attribuables également aux rayonnements sont : un accroissement de la mortalité générale (mis à part cancers et leucémies) dans les dix premières années après l'irradiation, un retard dans la croissance et le développement, et enfin des troubles de l'oeil.

Les réacteurs surgénérateurs

De nombreux pays, dont la France, étudient⁽⁺⁾ un réacteur "surgénérateur", ainsi appelé parce qu'il produit plus de plutonium Pu^{239} qu'il n'en consomme. On dit aussi réacteur "à neutrons rapides". Dans les réacteurs précédents les neutrons de fission sont ralentis dans un matériau (graphite par exemple) dit "modérateur", alternant avec les cylindres d'uranium, pour augmenter le rendement du combustible parce que les neutrons ralentis ont une plus grande probabilité de provoquer une nouvelle fission. Dans les surgénérateurs, pas de modérateur, mais un coeur de petite dimension, dix fois plus petit que celui d'un réacteur à uranium naturel, contenant de l'uranium (sous forme UO_2) et/ou du plutonium (PuO_2) enrichis. Pour entretenir la réaction, compte tenu de la densité de ce coeur, il n'est pas nécessaire de ralentir les neutrons, très abondants au sein d'une masse de noyaux presque tous fissiles, d'où l'expression "à neutrons rapides".

Il faut environ 1000 kg de plutonium dans le coeur d'un réacteur surgénérateur de 1000 MW. L'investissement en matière fissile est très onéreux ; il faut extraire le maximum de la puissance thermique dégagée, dont la densité est très élevée : de l'ordre de 1 kilowatt par cm^3 de coeur. En présence d'une source de chaleur aussi intense, il n'est pas possible d'utiliser l'eau pour transporter la chaleur. On utilise le sodium en fusion.

Les difficultés technologiques de ce type de réacteur sont beaucoup plus grandes que celles qu'on rencontre autour des précédents. La résistance mécanique des cylindres scellés contenant le combustible nucléaire est mise à plus rude épreuve par la température et le flux de neutrons beaucoup plus intense. Quant au sodium fondu, il s'enflamme spontanément à l'air et doit être maintenu dans un circuit étanche.

Dans les deux types de réacteurs décrits précédemment, le problème principal est : "Comment faire pour que la réaction en chaîne ne s'arrête pas ?". Dans le réacteur surgénérateur, le problème est l'inverse : "Comment faire pour que le réacteur ne s'emballe pas ?". Outre les rejets habituels de déchets radioactifs (voir plus loin), le réacteur surgénérateur fonctionne beaucoup plus près des limites de la réaction en chaîne incontrôlé (de la bombe !) que ne le font les réacteurs précédents. En revanche, ils fournissent beaucoup plus de plutonium qu'ils n'en consomment. Non seulement les militaires en auront à profusion, mais l'abondance même du plutonium produit devient un danger. Il y avait déjà 7000 kg de plutonium fabriqués en 1970, on s'attend à 100 000 kg de plutonium produits avant l'an 2000, et un millionième de gramme suffit à provoquer le cancer des poumons sur les animaux de laboratoire. Le temps que l'activité d'un stock donné de plutonium-239 ait diminué de moitié est de 24 400 ans.

(+) L'EDF a décidé de construire une centrale équipée d'un réacteur surgénérateur de 1200 MW. Elle sera construite dans l'Ain, région de Bugey, entre Belley et St-Vulbas, sur le Rhône. Les compagnies allemande RWE et italienne ENEL sont associées au projet. La société Babcock vient de terminer en 1972, en collaboration avec le CEA et l'EDF, un réacteur surgénérateur fournissant non pas de l'électricité mais de la vapeur, prototype pour le chauffage urbain direct.

V - AUGMENTATION DU RAYONNEMENT AMBIANT DU A L'ACTIVITE
DES CENTRALES NUCLEAIRES ET AUX EXPLOSIONS NUCLEAIRES

La radioactivité totale produite par un réacteur nucléaire ou une bombe nucléaire n'est pas simple à évaluer. Connaissant l'énergie totale libérée, si l'on connaît le type de combustible (ou explosif) utilisé, on peut calculer le nombre de noyaux qui ont fissionné et, connaissant la répartition moyenne des noyaux résidus de fission, on peut calculer la radioactivité totale produite. Mais ce n'est pas suffisant. La réaction en chaîne s'arrête lorsque les neutrons émis ne rencontrent plus de noyaux d'uranium (ou autre). Or cette énorme quantité de neutrons émis ne se perd pas pour autant. Tous ces neutrons rencontrent d'autres noyaux qui peuvent être alors transformés en noyaux radioactifs. Ainsi, par exemple, le tritium H^3 ou le carbone C^{14} sont des noyaux radioactifs formés dans l'air, dans l'eau ou le sol, autour de l'explosion nucléaire, en plus des produits de fission provenant de l'explosif nucléaire. Dans les centrales, les matériaux du coeur et autour : gaines des barreaux d'uranium, liquide refroidisseur, enveloppes et blindages de toutes sortes, deviennent radioactifs et très délicats à manipuler pour le personnel.

La radioactivité du réacteur nucléaire (*)

Considérons par exemple le cas d'un réacteur de 1 000 MW.an⁽⁺⁾ utilisables, ce qui, compte tenu de l'efficacité de 32%, en fait un générateur de 3 120 MW. Le coeur contient 20 000 à 40 000 cylindres métalliques (gaines) de 1,3 cm de diamètre et 3,5 m de long soudés à chaque extrémité et remplis de morceaux d'oxyde d'uranium UO_2 , soit au total une centaine de tonnes de UO_2 renouvelé par tiers chaque année.

Rejets radioactifs en fonctionnement normal. La plupart des fragments lourds résidus de la fission restent à l'intérieur des gaines, mais si l'oxyde d'uranium dépasse son point de fusion ($2\ 750^\circ C$), les résidus gazeux comme le tritium, le krypton, le xénon et l'iode diffusent hors des morceaux d'uranium et créent une très forte pression à l'intérieur des gaines qui contribue à leur déformation et à leur rupture. Ces ruptures de gaines sont assez courantes et en général n'affectent pas le fonctionnement du réacteur. Il suffit tout simplement de remplacer la gaine défectueuse et de vidanger l'eau du réacteur en rejetant évidemment

(*) D'après T.H. Pigford, IEEE Trans. ou Nuclear Science. Vol. N5-19, n° 1, Fév 1972.

(+) $1000\ MW.an = 1000\ 000\ 000\ W \times 365\ j \times 24\ h/j = 8760\ milliards\ de\ W.h\ ou\ 8,76\ milliards\ de\ kWh.$

l'eau contaminée dans la nature. Par ailleurs, un nombre énorme de neutrons s'échappe des cylindres et produit des réactions soit dans l'eau du réacteur, soit avec les matériaux environnants. Il faut noter que les gaines constituent la protection principale entre l'uranium ou les déchets radioactifs et le milieu extérieur. En fonctionnement normal, on produit des déchets radioactifs solides, liquides et gazeux. Les produits gazeux sont conservés une trentaine de jours pour que le plus gros de l'activité ait le temps de s'apaiser, puis on les rejette par la cheminée dans l'atmosphère, essentiellement le krypton-85 de vie moyenne 15,5 années. Pour les produits liquides, essentiellement de l'eau tritiée⁽⁺⁾, on essaie de les récupérer, ce qui est assez difficile. Le plus souvent, on s'arrange pour que la source d'eau de refroidissement soit suffisamment abondante (près de 4 millions de m³ par jour) pour que le rejet des produits radioactifs dans cette eau ne dépasse pas la "limite tolérée"^(x) : rejet moyen de césium-137, d'iode-131 et de molybdène-99, environ 4 curies par an, rejet de tritium H³ environ 6 000 curies par an.

Les déchets solides constituent évidemment la partie la plus importante. Dans le réacteur considéré ici, où l'oxyde d'uranium UO₂ est renouvelé par tiers tous les ans, l'activité moyenne au sein du réacteur est de 10 milliards de curies. Chaque année, au moment du renouvellement du combustible UO₂, une trentaine de tonnes de déchets dont l'activité est 4 milliards de curies sont sortis du réacteur et stockés dans de l'eau auprès du site du réacteur. L'eau sert à refroidir cette masse énorme encore très active - donc dégageant beaucoup de chaleur - qui pourrait devenir dangereuse. La plupart du temps, cette eau de refroidissement fortement contaminée est encore tout simplement rejetée dans la nature. Après environ 3 mois, le temps de laisser réduire la plus grosse partie de l'activité, ces déchets sont envoyés dans des fûts blindés et refroidis à l'usine de traitement des combustibles irradiés (La Hague et Marcoule en France). Le but du traitement est double : 1) récupérer le maximum d'uranium U²³⁵ et de plutonium^(*) Pu²³⁹ qui seront réutilisés dans les réacteurs ou les bombes, et 2) se débarrasser des produits irrécupérables. A l'usine on commence d'abord par dissoudre dans l'acide les cylindres métalliques contenant l'uranium usagé. Parmi les résidus gazeux, on récupère l'iode I¹²⁹, mais le krypton Kr⁸⁵ et environ un tiers du tritium H³ sont rejetés par la cheminée de l'usine. Le reste du tritium est rejeté

(+) Au lieu de l'eau ordinaire H₂O ou H¹ - O¹⁶ - H¹, l'eau tritiée s'écrit H¹ - O¹⁶ - H³. H³ est le tritium radioactif de vie moyenne 17.7 ans.

(x) Ici juge et partie puisqu'il pollue et fixe les limites de la pollution, le pouvoir public a toujours été assez insensible à ce qui peut être toléré par les administrés. Faut-il rappeler la journée de travail de 8 à 10 heures des enfants de 8 ans et moins avant 1850, et la retraite des vieux à 410 F par mois aujourd'hui ?

(*) Le plutonium est obtenu comme sous-produit lors du bombardement de l'uranium U²³⁸ par les neutrons : U²³⁸ + n donne U²³⁹ qui se transforme en quelques jours en plutonium Pu²³⁹.

dans l'eau du voisinage sous forme d'eau tritiée. Le reste des produits de fission : boue et liquides est concentré au maximum et stocké ou rejeté à la mer dans des réservoirs soi-disant étanches⁽⁺⁾. Dans le cas de notre réacteur de 1 000 MW, et compte tenu de la baisse d'activité au cours du temps, l'ensemble des déchets solides ou liquides irrécupérables représente 65 millions de curies par an au moment du stockage, soit environ un an après la sortie du réacteur. En principe, ces déchets devraient être stockés dans un lieu sûr pour

" Les carburants fossiles ne pourront pas satisfaire à la demande croissante en énergie du monde. Il n'y a que trois sources d'énergie connues suffisamment puissantes : l'énergie solaire, l'énergie de fusion et l'énergie de fission. La première est libre de toute pollution et la seconde presque sans pollution. La troisième est nécessairement associée à la production d'énormes quantités d'éléments radioactifs dangereux.

... A mon avis, les dangers associés à l'énergie de fission n'ont pas reçu suffisamment d'attention. On peut discuter le fait que la pollution causée par les réacteurs à fission en fonctionnement normal soit ou non au dessous d'un niveau de sécurité. Mais si un réacteur s'emballe, les conséquences peuvent être terribles. Même si l'on prend des mesures de sécurité extrêmes, l'énorme quantité de matériaux radioactifs qu'ils contiennent constitue un danger permanent. Par exemple, dans des périodes d'instabilités politiques ou sociales, l'attaque ou le sabotage de réacteurs peut provoquer des catastrophes. De plus, dans un programme énergétique basé sur la fission, l'énorme quantité de déchets radioactifs deviendra bientôt telle qu'un empoisonnement total de notre planète est possible."

Hannés Alfvén, Prix Nobel de Physique 1970 conjointement avec Louis Néel
Mémoire adressé au Sénateur M. Gravel de l'Alaska en Avril 1970

au moins 600 à 1 000 ans pendant lesquels ils restent très dangereux. La figure 13 montre le sort des produits radioactifs rejetés par un réacteur de 1 000 MW utilisables.

(+) La politique adoptée par la France pour se débarrasser des déchets radioactifs est une affaire qui ne regarde que les experts. Elle n'est probablement pas secrète, mais elle n'est pas diffusée dans le public non plus. Puisqu'on vous dit qu'on s'en occupe !

C'est donc, comme pour le reste, aux USA qu'on va chercher les informations. Justement, ce problème a été évoqué récemment dans une commission du Congrès US à propos d'un dépôt éventuel entre 200 et 700 mètres de profondeur dans une mine de sel au Kansas, trouvaille du Commissariat à l'Énergie Atomique (AEC) des USA. S'y opposent : le Bureau Géologique et le Département de l'Intérieur du Kansas et le Général Accounting Office (GAO), sorte de Cour des Comptes US. En effet, il a été découvert que sur les 281 000 m³ de déchets que l'AEC stockait à Richland (Wash) 86,4 m³ représentant 140 000 curies de césium-137, avaient déjà fui dans le sol. Ceci pour apprécier la haute technicité des "experts" de l'A.E.C.

Lorsque l'AEC proposa de stocker les déchets radioactifs dans la mine de sel, le Bureau Géologique du Kansas demanda des précisions sur l'emballage. Dans des fûts (3 m de long, 15 cm de diamètre) de céramique enrobée d'acier inox. A première vue, cela paraît sérieux. Sur une question plus pertinente, l'AEC a avoué que les radiations et le sel détruiraient l'acier inox en 6 mois environ et la céramique en 3 ans au plus.

Pour plus de détails, voir le Bulletin of the Atomic Scientists, Juin 1971, page 27.

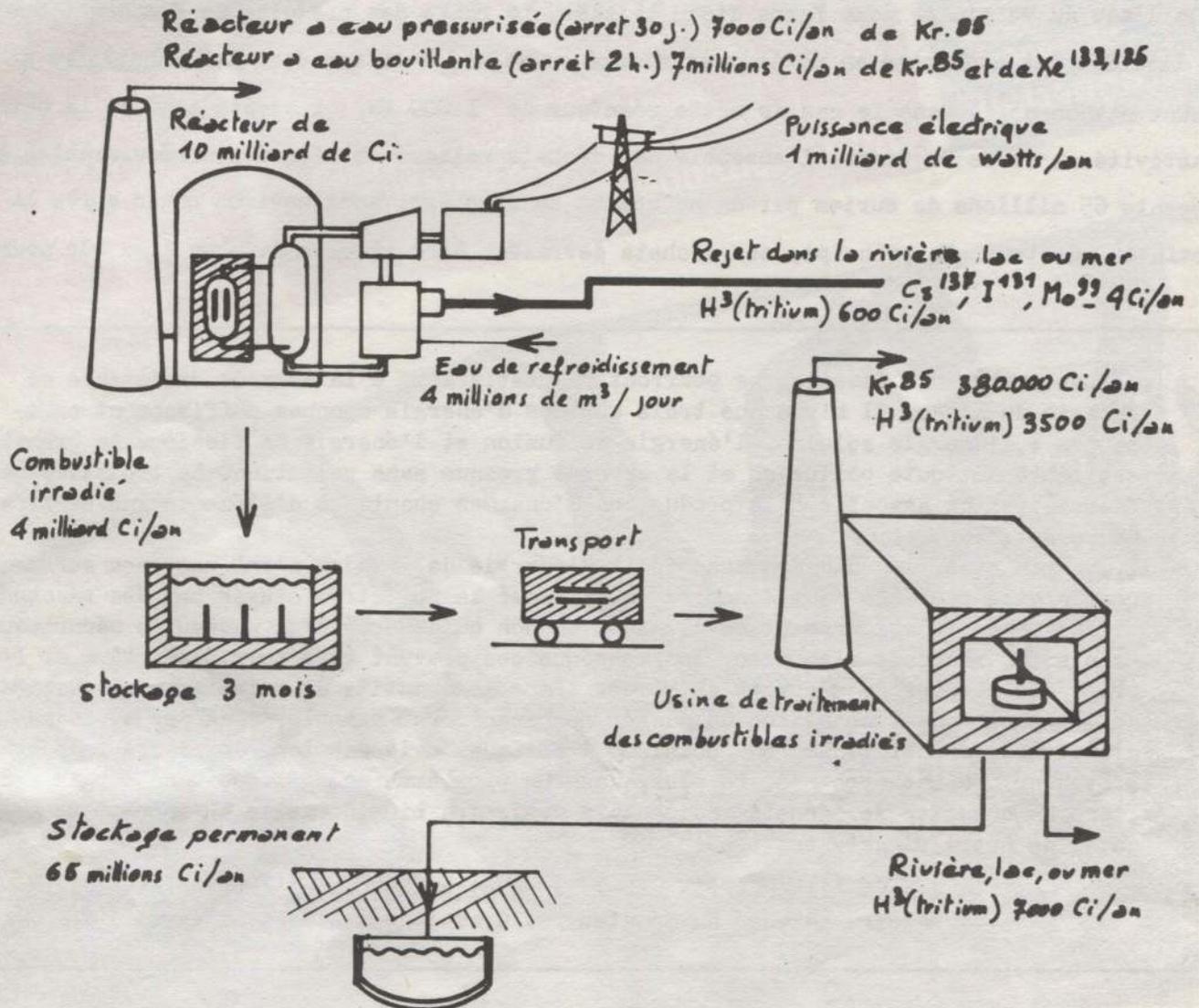


Fig: 13

Produits radioactifs rejetés annuellement par un réacteur de 1000 MW utilisables.

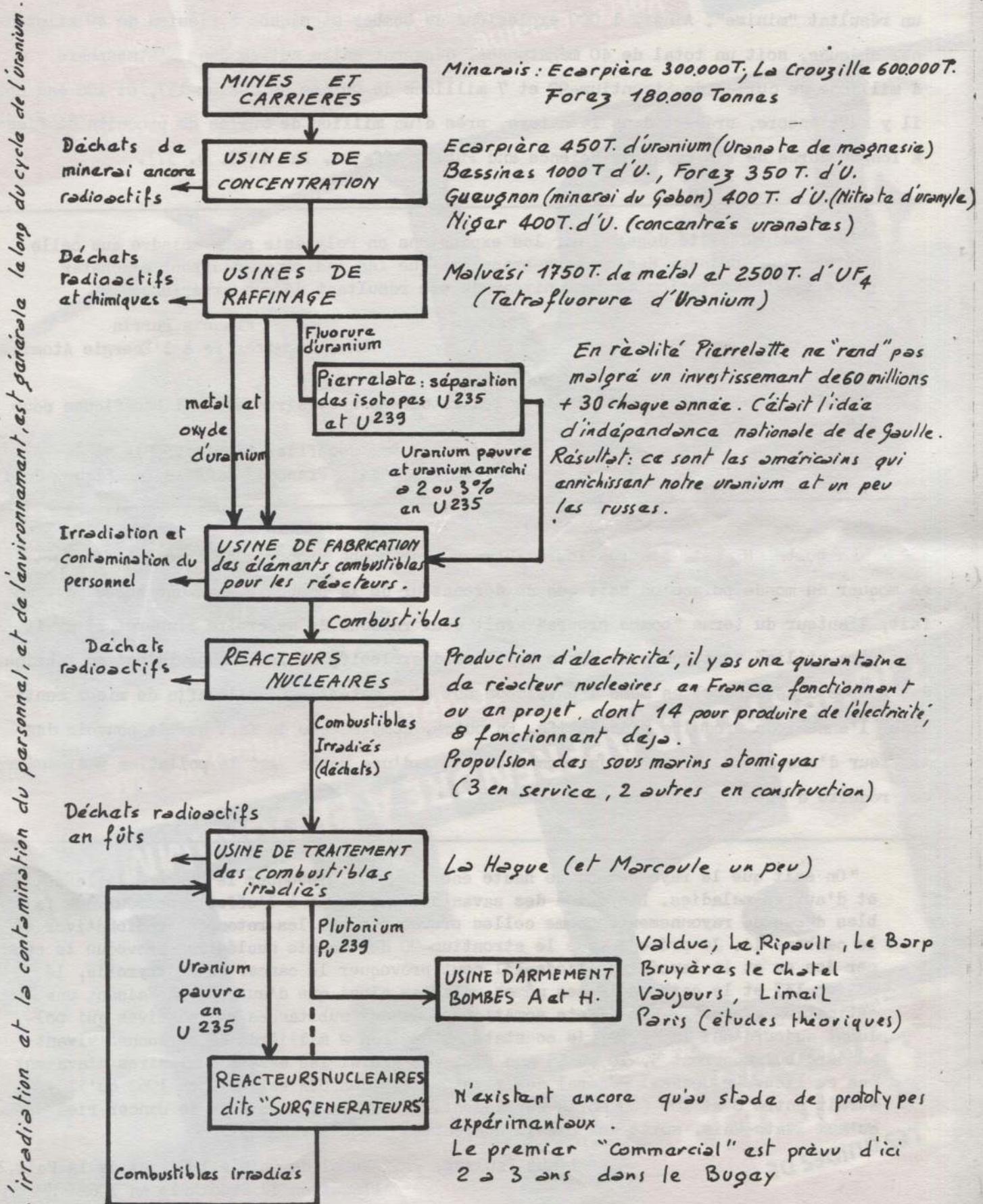
"Le nucléaire apporte une solution quasi-parfaite : pollution rigoureusement nulle, indépendance énergétique, bas prix de revient."

Dirigeant EDF, Lyon, Oct 1971

"Les centrales nucléaires se placent beaucoup plus avantageusement du point de vue de notre indépendance énergétique ... Du point de vue si actuel de l'environnement, les centrales nucléaires sont propres : elles polluent beaucoup moins l'atmosphère que les autres, car elles n'émettent aucun gaz."

Louis Néel, Prix Nobel de Physique 1970
 conjointement avec Hannés Alfvén

LE CYCLE DE L'URANIUM (Chiffres de 1971)



Les bombes nucléaires

La bombe A est ce qu'on appelle une bombe malpropre en ce sens qu'elle dégage comparativement beaucoup de produits radioactifs nocifs très longtemps et très loin pour un résultat "minime". Ainsi, 1 000 explosions de bombes atomiques à fission de 40 kilotonnes chacune, soit un total de 40 mégatonnes, dégagent entre autres dans l'atmosphère 4 millions de curies de Strontium-90 et 7 millions de Curies de Césium-137, et 100 ans après il y aura encore, présent dans la nature, près d'un million de curies de produits de fission à longue durée de vie (d'après Science and Public Affairs, Mai 1972, p. 37).

"La radioactivité dégagée par les explosions en Polynésie sera moindre que celle des cadrans lumineux des montres-bracelets que les indigènes pourront s'acheter grâce à l'augmentation de leur niveau de vie résultant de ces expériences."

Francis Perrin
Haut Commissaire à l'Energie Atomique

"Nul n'a jamais osé prétendre que les retombées nucléaires étaient bénéfiques pour l'homme."

Dr. Escoffier-Lambiotte, le Monde
Après les essais Français dans le Pacifique, Juil 72

La bombe H est, d'après leurs auteurs, une bombe propre. C'est ce qui s'appelle se moquer du monde puisqu'on sait que le détonateur de la bombe H est une bombe A. En fait, l'auteur du terme "bombe propre" avait deux raisons de se croire sincère. Il avait peut être utilisé tout juste la masse critique d'explosif, alors qu'aujourd'hui on fabrique des bombes dans lesquelles même l'enveloppe est d'un matériau fissile afin de mieux contaminer l'ennemi de produits radioactifs. En outre, compte tenu du fait que le pouvoir destructeur d'une bombe H est plusieurs fois celui d'une bombe A, la pollution radioactive est réduite d'autant - proportionnellement !

"On sait que le rayonnement de haute énergie peut provoquer le cancer, la leucémie et d'autres maladies. L'opinion des savants varie quant à l'effet cancéreux des faibles doses de rayonnement, comme celles provoquées par les retombées radioactives et le carbone-14. Je prétends que le strontium-90 des essais nucléaires provoque le cancer des os et la leucémie, l'iode-131 peut provoquer le cancer de la thyroïde, le césium-137 et le carbone-14 ces mêmes maladies ainsi que d'autres. En faisant une estimation grossière des effets somatiques dus aux substances radioactives qui polluent aujourd'hui la Terre, je constate qu'environ 2 milliards de personnes vivant aujourd'hui mourront 5, 10 ou 15 ans plus tôt que si les essais nucléaires n'avaient pas eu lieu. Le Conseil Fédéral des rayonnements des USA estimait en 1962 qu'il y aurait entre 0 et 100 000 morts supplémentaires de la leucémie et de cancer rien qu'aux Etats-Unis, suite aux essais nucléaires jusqu'à fin 1961."

Linus Pauling, Prix Nobel de Chimie, 1954, et de la Paix, 1962
Allocution de Stockholm en 1962

Lorsqu'on connaît la puissance de la bombe, on peut en déduire le poids de l'uranium fissionné dans le cas de la bombe A et deviner celui du détonateur de la bombe H. Les tables précédentes permettent alors de calculer l'activité des déchets répandus dans l'environnement. Toutefois, il faut tenir compte également des produits radioactifs créés par l'explosion elle-même comme le tritium H^3 ou le carbone C^{14} . ~~NAT~~ et ses collaborateurs, cités dans IEE trens, on Nuclear Science, vol. NS-19, Fev 1972, page 27, évaluent à 69 millions de curies le tritium formé annuellement dans l'atmosphère terrestre par les rayons cosmiques. Ils évaluent à 25 fois cette quantité, le tritium formé dans l'atmosphère entre 1951 et 1962 du fait des quelques 120 explosions militaires.

De même qu'on trouve aujourd'hui du DDT dans le lait maternel, le dégagement des produits radioactifs dans la nature n'est pas passé inaperçu des biologistes. Comme le signalait le Docteur Escoffier-Lambiotte dans "Le Monde" après l'explosion française dans le Pacifique en Juillet 1972 :

"On ne peut ignorer que la teneur en strontium-90 du pain et du lait français s'est trouvée décuplée de 1960 à 1963 au temps des essais soviéto-américains ; ou que cette teneur est 40 fois plus élevée dans les os des enfants britanniques qui ont vécu leur croissance durant cette période que dans ceux des adultes".

Des solutions ?

Avant de quitter ce chapitre, je voudrais dissiper quelques malentendus concernant les possibilités de "nettoyer" ou d'"éliminer" la pollution radioactive à l'aide de solutions techniques présentes ou futures.

Tout d'abord, il est absolument impossible de désactiver un bloc d'un matériau radioactif ; on peut l'activer, mais pas le désactiver. Il est possible d'imaginer comment désactiver un atome ; toutefois, outre que les moyens nécessaires sont du domaine de la science fiction, l'énergie nécessaire - fournie évidemment par un réacteur nucléaire ! - ferait plus de déchets radioactifs qu'elle n'en pourrait éliminer. On a déjà signalé les difficultés d'un stockage éventuel des déchets radioactifs. Le stockage est possible... pour 10, 20 ou 30 ans ; mais il est tout à fait exclu de pouvoir maintenir des dépôts de plus en plus énormes à l'abri de toute modification géologique du sol ou des mers pendant des milliers d'années. Parmi ces déchets, il faut également signaler le plutonium-239 bientôt pléthorique. A 10 000 dollars le kg (50 000 F) la Commission à l'Energie Atomique américaine s'inquiète qu'il puisse être bientôt accessible au marché noir à n'importe qui (+).

(+) Nixon du Viet Nam, Kroutchev de Tchécoslovaquie et de Gaulle d'Algérie ne sont pas n'importe qui. Nuance !

Lettre ouverte de chercheurs australiens au gouvernement français à propos des essais nucléaires français dans le Pacifique

■ Nous vous écrivons au moment de la reprise par le gouvernement français des essais nucléaires dans l'atmosphère en Polynésie, reprise décidée en dépit des protestations des peuples de la région.

Nous craignons qu'on ne se rende point compte en France de la vigueur du sentiment populaire en Australie contre ces expériences qui, commencées en 1966, doivent se poursuivre jusqu'en 1976, ni de l'amère désillusion de ceux qui croient à la culture et à la civilisation françaises. Comme scientifiques et médecins, nous partageons ces sentiments pour les raisons que voici :

Tout d'abord, on nous assure que ces essais nucléaires ne sont pas nocifs, l'irradiation résultant des retombées radioactives étant négligeable par rapport à l'irradiation naturelle. Une telle affirmation n'a aucune justification scientifique. La Commission internationale pour la protection radiologique (ICRP) déclare que toute exposition à une irradiation qui n'est pas nécessaire doit être évitée. Elle déclare aussi qu'il n'y a pas de seuil vérifiable au-dessous duquel aucun dommage n'est subi⁽¹⁾. D'autre part, il a été prouvé que des doses de basse intensité sont nocives : chez les enfants dont les mères ont été soumises à une radiologie abdominale, au cours de leur grossesse, la probabilité d'une mort par leucémie avant l'âge de huit ans est une fois et demie plus grande que chez les enfants dont les mères n'ont pas été irradiées. Basant ses calculs sur l'hypothèse d'une relation linéaire entre la dose et l'effet, l'ICRP a estimé qu'une dose de 1 rad au-dessus de l'irradiation naturelle pourrait produire 20 cas supplémentaires de leucémie, ou 120 cas d'autres cancers, par million de gens exposés⁽²⁾. Plusieurs auteurs⁽³⁾ arrivent à des chiffres comparables. Dans le cas de « singlebreak aberrations » des chromosomes, la relation expérimentale entre la dose et l'effet est linéaire pour les doses de basse intensité.

Outre le fait que toute irradiation au-delà de l'irradiation naturelle doit constituer une cause de souci et mérite d'être sujet de recherches approfondies, il y a, dans des essais nucléaires dans l'atmosphère, un danger particulier qui est qualitativement différent des effets de l'irradiation naturelle : les doses sont administrées intérieurement par les radio-isotopes ingérés avec l'air, avec l'eau bue et avec la nourriture. Concentrées et accumulées à l'intérieur d'un organe critique, ces isotopes peuvent dissiper leur énergie dans un tout petit volume. L'iode-131, l'un des isotopes de courte durée, est ingéré principalement avec le lait, mais aussi avec l'eau et se trouve concentré dans les thyroïdes. Le danger de son action est particulièrement grand pour les bébés et pour les jeunes enfants en raison de la petitesse de leurs glandes, de leur consommation exclusive ou importante de lait, et aussi du fait que le tissu de la glande thyroïde infantine pourrait être, d'après l'ICRP, plus sensible à l'irradia-

tion que celui des adultes. L'enregistrement en Australie du déchet radioactif résultant des premières expériences nucléaires françaises au-dessus de l'océan Pacifique Sud a montré que des concentrations significatives d'iode-131 sont déposées dans le lait deux à trois semaines après chaque explosion. Cette contamination a été aussi mesurée dans les glandes thyroïdes de moutons⁽⁴⁾. En 1968, la concentration d'iode-131 dans le lait de la région de Malanda, Queensland (pays d'industrie laitière), atteignit 180 pCi/l⁽⁵⁾, et l'année précédente la valeur maximale avait été 570 pCi/l⁽⁶⁾, alors que la concentration naturelle est de zéro pCi/l. La dose de rayonnement accumulée en un an dans la thyroïde provenant de ce lait était, en 1966-67, de 226 mrad. Un enfant dont la thyroïde est plus petite que celle utilisée dans ces calculs (étalon international de 2 g) et qui consomme plus de 0,7 litre de lait par jour pourrait recevoir une dose comparable à celle indiquée en 1965 par le National Radiation Advisory Committee⁽⁷⁾ comme limite de tolérance, c'est-à-dire 840 mrad par an. Au surplus, la dose reçue d'un isotope de courte durée l'est à un taux bien plus élevé que celui de l'irradiation naturelle. En effet, si l'on tient compte de la possibilité d'un effet du taux de dose et de l'accumulation de l'iode dans la thyroïde, il n'est pas évident que la dose annuelle d'irradiation naturelle doive être prise en compte dans l'évaluation des dangers dus aux isotopes radioactifs dans le corps.

Le strontium-90, isotope de longue durée, continuera à se déposer sur l'Australie pendant plus de trente ans. Cet isotope est absorbé avec la nourriture et déposé dans les os. L'incorporation de strontium-90 dans les os se fait essentiellement pendant les deux premières années de la vie. En outre, pour des raisons pas encore connues, le lait d'Australie présente une concentration de strontium-90 double de celle que l'on trouve dans l'hémisphère nord. Cette incorporation de strontium en fait une source potentielle de cancer des os ainsi que de mutations leucémiques dans la moelle épinière. Le strontium-90 provenant des expériences nucléaires françaises a constitué une fraction significative de la précipitation totale annuelle sur l'Australie depuis 1968⁽⁷⁾.

L'irradiation des retombées radioactives est reçue par toute la population, les bébés et les femmes enceintes inclus. Comme les déchets radioactifs des expériences de Mururoa voyagent vers l'est, la quantité de déchets déposés dans certaines régions de l'Amérique du Sud doit être beaucoup plus grande que celle mesurée en Australie. Un autre problème qui mérite attention est que les susceptibilités individuelles à l'irradiation doivent être assez diverses. Les effets à long terme d'une irradiation de basse intensité à laquelle toute une population est exposée ne sont pas connus. Il a fallu des années

pour que les dangers de la radiographie deviennent apparents. Mais son utilisation médicale apporte au moins des bénéfices à l'individu, bénéfices qui peuvent être pris en compte dans l'estimation des dangers.

« Comme il n'y a pas de mesures effectives pour empêcher les effets nocifs d'une contamination radioactive globale par les explosions nucléaires, la cessation définitive de ces expériences constituerait un bienfait pour les générations présentes et futures. »⁽⁸⁾.

Mark Diesendorf, Colin Pask
(Institute of Advanced Studies,
Research School of Physical Sciences,
Australian National University)

R.A. Melick, M. Denborough
(Department of Medicine, University
of Melbourne, Royal Melbourne
Hospital)

Charles Birch
(Head of School of Biological
Sciences, University of Sydney)

T.A. Thomson-
(School of Engineering, University
of Sydney).

(1) *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, ICRP Publication 9, Pergamon Press, 1966.

(2) *Health Phys.*, 12, 239, 1966.

(3) L. Pauling, *Bull. Atomic Sci.*, 26, n° 7, 3, 1970 ; J.W. Gofman et A.R. Tamplin, *ibid.*, p. 2.

(4) R. Melick et L. Van Middlesworth, *Med. J. Aust.*, 2 930, 1966.

(5) J. Bonneyman et J.C. Duggleby, *Aust. J. Sci.*, 31, 389, 1969.

(6) J. Bonneyman et J.C. Duggleby, *Aust. J. Sci.*, 30, 223, 1968 ; 29, 402, 1967.

(7) National Radiation Advisory Committee (NRAC) of Australia, (1965) : *Report to the Prime Minister*.

VI - LA CONTROVERSE ENTRE PARTISANS ET OPPOSANTS
DES CENTRALES NUCLEAIRES

Il s'agit ici essentiellement de la controverse entre des scientifiques, non pas sur l'utilité des centrales nucléaires, chacun semble être convaincu de leur utilité, mais sur les normes de protection de la population. Parmi les opposants aux centrales nucléaires telles qu'elles sont construites actuellement, on trouve J.W. Gofman, professeur de physique médicale et A.R. Tamplin, biologiste, Linus Pauling, Prix Nobel de Chimie, 1954, et Prix Nobel de la Paix, 1962, et de nombreux autres. Par exemple, Hannés Alfvén, Prix Nobel de Physique, 1971, que je cite parce que Louis Néel qui a eu le Prix de Physique conjointement avec Alfvén, a eu l'honneur de la télévision pour annoncer du haut de sa renommée qu'il ne voyait pas de danger aux centrales nucléaires. Bien entendu, Hannés Alfvén, lui, qui est contre, n'était pas là pour lui donner la réplique, comme il se doit dans une démocratie éclairée dans la direction unique des bénéfices maximums.

La raison pour laquelle le gouvernement prend la peine de faire rassurer le vulgus pecum par son grand prêtre officiel est que, précisément, s'il avait des arguments convainquants, n'importe qui aurait fait l'affaire. Molière avait déjà remarqué que, pour les médecins comme pour les hommes de loi, plus leur savoir était illusoire, plus il fallait de mise en scène solennelle pour les faire passer. Sans contradicteur, Louis Néel a joué pour nous à la télévision le rôle de Monsieur Purgon. Merci Monsieur Néel, vous avez bien mérité de la crédulité publique.

Quand on sait que la thalidomide (des milliers de bébés malformés) ou l'hexachlorophène (une quarantaine de bébés morts en France plus un nombre indéterminé avec des lésions cérébrales) - produits au demeurant parfaitement inutiles - avaient déjà été dénoncés comme dangereux depuis plusieurs années (interdits aux USA) et qu'il aura fallu ces tragédies pour en priver le roi COMMERCE en France, on comprendra les difficultés auxquelles se heurtent les opposants du nucléaire.

Au Moyen Age, le paysan qui aurait eu l'idée saugrenue d'intenter un procès au Seigneur chassant dans ses récoltes, aurait eu à prouver ledit dommage au Seigneur lui-même ou à un juge à sa soldé, l'Eglise étant là pour cautionner auprès du paysan le Pouvoir "divin" du Seigneur. Ralph Nader dans "le Festin empoisonné" a retrouvé les mêmes problèmes d'un monde plongé dans l'arbitraire où le pouvoir - nouvelle Eglise - cautionne le "Droit des pollueurs" et :

- 1- Fait croire au public que c'est à lui, et non pas aux pollueurs, de prouver les effets nocifs de la pollution.
- 2- Fait admettre, par le biais des normes sur l'air ambiant, l'idée que l'industrie a le droit de polluer jusqu'à un certain seuil .
- 3- Cache les faits derrière l'ésotérisme d'un certain jargon scientifique.

Il est bien évident que l'objection 1° ne tient que dans le cadre du rapport de forces actuel. Voyons voir ce qu'il en est des deux autres points.

Quel est, tout d'abord, l'ordre de grandeur de la pollution due aux centrales nucléaires ? D'après l'Agence Internationale de Vienne, la puissance installée en électricité nucléaire qui est de 20 000 MW (en juin 1972), atteindra 300 000 MW en 1980 et 3 millions de MW en l'an 2000. Comme la pollution est strictement proportionnelle à l'énergie fournie, il suffit de multiplier par le facteur approprié tous les chiffres que nous avons cités à propos de la centrale de 1000 MW pour voir ce qu'il en est. Bien entendu, c'est aux Etats-Unis que le problème est le plus aigu. D'ici l'an 2000 (c'est bientôt !), il faudrait prévoir une centrale tous les 10 km sur la côte Californienne. Sur la côte Atlantique, l'opposition des groupes anti-nucléaires ainsi que la difficulté d'obtenir des droits de passage pour les fils à haute tension, obligent à lancer des centrales flottantes en mer, au large des grandes villes. Deux centrales à eau pressurisée de 1,5 MW chacune sont déjà prévues pour 1980 à 5 km au large de l'état du New Jersey, près d'Atlantic City - la ville balnéaire des élections de Miss Amérique - coût d'installation : 5 milliards de F.

Qu'en est-il en France ? D'après l'EDF, voici la consommation et les prévisions jusqu'en l'an 2000 des besoins en électricité en France (en milliards de KWh).

Année	1960	1970	1971	1972	1975	1985	2000
Production électrique totale	75	140	147	163	200	400	1000
Part du nucléaire	0%	4%	6%	8%		30%	90%

Or 90% de 1000, c'est 900 milliards de KWh. La centrale de 1000 MW que nous avons considéré précédemment ne fournit pas tout à fait 9 milliards de KWh (voir la note au bas de la page 38). Il en faudra donc une centaine en France pour obtenir cet électricité ou près de 200 comme celle de Bugey I qui en fournit à peu près la moitié. En fait, compte tenu des arrêts, des pannes inéluctables, de l'impossibilité d'un fonctionnement permanent à pleine puissance et des heures de pointe dans la consommation, il faudra augmenter ce nombre d'au moins 50%. Or l'an 2000, c'est bientôt. Si je considère la France comme un carré de 700 km de côté et si je mets une centrale tous les 50 km, j'en place à peine 200. Ainsi vous en aurez toujours une à moins de 20 ou 30 km de chez vous, sans tenir compte des usines de traitement du minerai et des usines de traitement des combustibles irradiés^(*). Quelle que soit

(*) L'usine de Malvési (Languedoc) raffine le minerai concentré, usine à Pontivy (Bretagne), mine et usine à Ecarpière et Mortagne sur Sèvre (Vendée), mine et usine à Bessines sur Gartempe, la Crouzille, St Pierre et Langagne (Centre), usine à Gueugnon (Bourgogne). Bien entendu les résidus de minerai dont l'activité est loin d'être négligeable sont entassés à l'air libre et délavés par les pluies dans le système hydrographique général d'où l'on tire l'eau potable. A Marcoule, Pierrelatte et Miramas dans la Vallée du Rhône, on traite l'uranium et le plutonium. A la Hague dans le Cotentin, 150 000 fûts de déchets radioactifs de plusieurs tonnes chacun sont empilés à l'air libre, le vent généralement de Nord-Ouest, disperse les déchets crachés par deux cheminées (100 m et 28 m) sur tout le nord du Cotentin. Capacité de traitement : 500 tonnes par an. Si, comme dit scientifiquement Louis Néel, ces usines "n'émettent aucun gaz" pourquoi diable faire les cheminées si hautes ?

la direction des vents, tout ce qu'on touchera ou mangera sera contaminé.

Par ailleurs, compte tenu du "progrès" de la science, deux nouvelles sources de rayonnement sont prévues pour bientôt.

1 - Le chauffage urbain direct par des centrales nucléaires génératrices de vapeur (voir la note au bas de la page 21), ce qui implique des centrales au voisinage des villes et la circulation d'eau plus ou moins contaminée dans les radiateurs d'appartement et.

2 - La création de réservoirs souterrains à coups de bombe atomique pour stocker le gaz de ville et le pétrole. Ceci est déjà prévu pour la région parisienne. Les officiels ont déjà trouvé la formule ad hoc pour l'intox de la population : "La ménagère utilisant pendant un an le gaz provenant d'une excavation atomique ne recevrait pas plus de rayonnement qu'un passager se rendant en Boeing de Paris à New York"⁽⁺⁾.

Le problème est donc le suivant. Nous recevons en moyenne une dose de radiations de l'ordre de 0,125 rem par an dues aux sources radioactives naturelles. La population peut-elle supporter sans crainte une augmentation de cette dose provenant du rejet dans la nature des déchets des industries et des centrales nucléaires ? Il est bien évident que cet accroissement "utilitaire" s'ajouterait aux radiations que nous recevons pour les soins médicaux et aux radiations dues aux retombées des explosions nucléaires militaires et civiles

L'argument du clan des "pour" est le suivant : il existe un seuil de rayonnement au dessous duquel il est impossible (actuellement !) de constater des effets sur la population. Donc, fixons une valeur quelconque, suffisamment au dessous de ce seuil, comme "dose maximale admissible" pour la population et tout le monde devrait être satisfait. On essaiera même de faire en sorte que ce soit effectivement une dose maximale et que, si possible, les gens en reçoivent beaucoup moins. Par ailleurs, même s'il s'avérait à la longue que cette dose a entraîné quelques bavures, la population accepte déjà pas mal de risques dans ses activités (travail, transports, jeux, etc...), elle se doit d'assumer également les responsabilités inhérentes à sa demande sans cesse croissante d'énergie qui ne peut être satisfaite que par l'énergie nucléaire.

Ce raisonnement est le type parfait du sophisme. Partant d'hypothèses apparemment justes du type : "il existe un seuil de rayonnement", "demande sans cesse croissante d'énergie" et "ne peut être satisfaite que par l'énergie nucléaire", on arrive à la situation paradoxale qu'il faudra en crever si l'on veut vivre dans le "confort". Comme le faisait remarquer Mr James Wright, Directeur du Département de l'Environnement (?) chez Westinghouse (qui fait les réacteurs à eau pressurisée) : "où ces décisions nous meneront-elles ?" et "souhaitons-nous vraiment en arriver là ?". That is the question ! Il est bien évident que ces questions - tout au moins en France - ne sont pas soumises à référendum. Pas plus que la question de

(+) Noter l'association subtile des idées : Boeing — grande vie — s'envoyer en l'air — rayonnement, on reconnaît le doigt d'un psychologue au moins colonnel !

savoir si nous voulons ou non les autoroutes, le Concorde, la force de frappe, des lignes maritimes ou aériennes déficitaires dites "de prestige", si nous souhaitons - comme c'est le cas - un salaire plus élevé pour un flic que pour un instituteur, des dépenses somptueuses pour les dirigeants, etc Avec, bien entendu, accompagnant chaque question, le montant de la facture pour chaque contribuable.

C'est vil et mesquin de parler gros sous, je sais. Moins cependant que de réduire à la déchéance des millions d'individus pour le luxe d'un petit nombre.

Le clan des "contre" est suffisamment étoffé pour contrer simultanément tous les arguments des pollueurs tant sur le plan de la logique : en démontrant le système de propagande de l'adversaire, que sur le plan du jargon ou des faits scientifiques.

Dans le système écologique limité dans lequel nous vivons, nous ne sommes pas à l'abri de nos propres déchets ; de plus, on note une concentration de certains de ces déchets dans les espèces végétales ou animales que nous utilisons pour notre nourriture. Ainsi, tous les déchets rejetés dans la nature reviennent vers l'homme par l'air, l'eau, les plantes et/ou les produits des animaux qu'ils consomment. La plupart du temps, ces déchets sont biodégradables, c'est à dire qu'ils sont décomposés dans la nature en éléments inoffensifs. Il n'en est plus de même pour certains produits de l'industrie moderne⁽⁺⁾ lesquels, comme les déchets nucléaires, sont toxiques ou mutagènes (c'est à dire pouvant entraîner des mutations génétiques) en quantité infinitésimales et pendant très longtemps. De plus, et c'est ce qui rend la notion de seuil caduque, on s'est aperçu que tous ces produits toxiques pouvaient être concentrés par les plantes et les animaux et arriver sur la table de l'homme en quantité mortelles⁽⁺⁾. Bien qu'on ne comprenne pas toujours le pourquoi de cette concentration dans les végétaux, les animaux supérieurs et dans l'homme, on peut le constater. Dans la plupart des poissons d'Atlantique Nord la concentration de PCB⁽⁺⁾ varie entre 0,01 et 1 ppm^(x), elle monte de 300 à 1000 ppm chez les cormorans et les orfraies. Le suédois en absorbe en moyenne 1 millionième de gramme par kilogramme de poids et par jour par le poisson ou le lait. On observe des concentrations analogues du mercure⁽⁺⁾ et bien entendu des éléments radioactifs. D'après Perkins et Nielsen, les poissons de la rivière Columbia contiennent 140 fois plus de zinc-65 et 2200 fois plus de césium-137 que l'eau de la rivière. Les exemples sont nombreux et bien connus des pouvoirs publics.

(*) Non compris les pays communistes, les quantités de produits chimiques rejetées ont été évaluées à : 1950 : 7 millions de tonnes, 1970 : 63 millions de tonnes, prévisions pour 1985 : environ 250 millions de tonnes.

(x) 1 ppm = 1 partie par million, c'est à dire 1 milligramme par kilogramme de poids.

(+) Au Sud du Japon en 1968, 1000 personnes intoxiquées par un hydrocarbure chloré, le PCB (polychlore biphenyl). Au Japon (1961), au Guatemala (1966), en Suède (1966), aux USA (1969) des milliers de personnes sont intoxiquées ou empoisonnées par le mercure. Des milliers de tonnes de thon en boîtes sont retirés de la consommation aux USA, au Canada et au Japon, le mercure rejeté dans les rivières était absorbé et concentré par les crustacés puis par les plus gros poissons qui se nourrissent des crustacés.

Linus Pauling (page 44), Hannés Alfvén (page 39) tous deux prix Nobel ont été parmi les premiers à dénoncer les dangers de la prolifération des activités nucléaires.

Plus précisément, Gofman et Tamplin, utilisant des méthodes éprouvées en biologie, ont montré qu'il n'existait pas de seuil de sécurité pour le rayonnement. Pour cela, s'appuyant sur l'ensemble des études faites précédemment et sur leurs propres expériences, ils ont montré qu'on pouvait mettre en évidence les effets de très faibles doses de rayonnement en mesurant simplement la dose nécessaire pour doubler le nombre de cancers et leucémies dans une population donnée. Il est en effet difficile de distinguer un cancer "naturel" d'un cancer provoqué par les produits chimiques ou le rayonnement nucléaire ; d'autant plus que le cancer dû au rayonnement met souvent plusieurs années pour se déclarer. Ils ont montré ainsi que toutes les formes de cancer ont des doses de doublement très voisines et un taux d'augmentation analogue par rad d'exposition, et que l'augmentation du nombre des tumeurs malignes est plus rapide chez les enfants que chez les adultes. Voici leurs résultats.

- La leucémie. Sachant qu'il y a en moyenne 60 leucémies par an et par million d'habitants, on doublera ce chiffre - soit donc 120 - , si chaque personne reçoit en moyenne entre 30 et 60 rad dans l'année. Statistiquement, cela signifie qu'on augmente le nombre moyen de leucémiques de 1,6 à 3,3% chaque fois que l'ensemble des individus d'une population reçoit 1 rad⁽⁺⁾. On tiendra compte du fait que les affections malignes provoquées par les radiations ont une période de latence (période avant laquelle la maladie se déclare) pouvant atteindre plusieurs années.
- Le cancer de la glande thyroïde. Il faut 100 rad pour doubler le nombre moyen des cancers de la glande thyroïde chez les adultes et 5 à 10 rad pour doubler ce nombre sur des enfants. Soit donc 1% d'augmentation pour les adultes et 20% pour les jeunes dans une population recevant 1 rad par an et par individu.
- Le cancer du poumon. Le doublement du nombre de cancers de poumon s'obtient avec 175 rad par an en moyenne sur tous les individus d'une population donnée. Soit une augmentation de 0,6% du nombre de cancers du poumon dans une population recevant une dose annuelle de 1 rad par personne.
- Le cancer du sein. Doublement du nombre des cancers du sein pour 100 rad, donc une augmentation de 1% par rad de rayonnement reçu annuellement par les individus d'une population.

Leurs résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Organes	Dose de doublement	% d'augmentation par rad et par habitant
Leucémie	30 à 60 rad	1,6 à 3,3
Cancers de la thyroïde (adultes)	100 rad	1
(jeunes)	5 à 10 rad	10 à 20
Cancer du poumon	175 rad	0,6
Cancer du sein	100 rad	1
Cancer de l'estomac	230 rad	0,4
Cancer du pancréas	125 rad	0,8
Cancer des os	40 rad	2,5
Système lymphatique et autres organes hématopoiétiques	70 rad	1,4
Carcinomatoses d'origines diverses	60 rad	1,7

(+) Si pour 30 rad le nombre de cancéreux double, soit une augmentation de 100%, à 1 rad correspond une augmentation 30 fois plus petite, soit 100% / 30 = 3,3%.

Les conclusions en ce qui concerne la population des USA (200 millions dont environ 100 millions de moins de 30 ans) sont les suivantes. Si chacun devait recevoir la dose dite "acceptable" de 0,17 rad par an — en plus évidemment du rayonnement naturel — depuis la naissance jusqu'à l'âge de 30 ans, ce qui fait $0,17 \times 30 = 5$ rad par personne. On peut s'attendre à environ 5% d'augmentation du nombre des cancers et leucémies chaque année. Il y en a actuellement 2 800 par million de personnes. L'augmentation serait donc de 140 par million ou 14 000 pour les 100 millions de moins de 30 ans. Gofman et Tamplin pensent qu'on peut ajouter 2 000 de plus pour tenir compte du fait que la population jeune est plus sensible au rayonnement. Ils arrivent donc à un total de 16 000 cancéreux de plus par an dans une population de 200 millions d'habitants. Comme il est bien évident que la France ne fera pas mieux pour la protection des individus que les USA dont elle a d'ailleurs copié ou acheté les centrales nucléaires, cela fait pour nous (50 millions d'habitants) 4 000 cancéreux ou leucémiques de plus chaque année.

Bien entendu ces statistiques ne sont pas contestées par les partisans des centrales nucléaires, ils font remarquer très logiquement que le public accepte sans sourciller un certain taux d'accidents du travail mortels, les risques de cancer du fumeur, etc... Les besoins en énergie de la civilisation moderne étant ce qu'ils sont, ce sera aux lecteurs de choisir. Je souhaite simplement que ce texte lui permette de choisir en toute connaissance de cause et de ne pas attendre d'hypothétiques solutions techniques promises dans les discours électoraux.

Nous reviendrons plus loin sur les "besoins" en énergie croissante qui est le motif altruiste avoué des partisans des centrales nucléaires. Il convient cependant de remarquer ici que le bien-être de la population a rarement autant attiré la sollicitude des gouvernants et n'a sans doute jamais bénéficié de crédits militaires.

Il apparaît clairement dans les lignes précédentes que la controverse sur l'énergie nucléaire est essentiellement une discussion entre savants étrangers. Ce sont surtout des savants américains qui, dès 1960, ont alerté l'opinion mondiale sur les dangers du nucléaire : David Lilienthal, premier président de l'Atomic Energy Commission, Linus Pauling, dans son livre "Vie ou Mort à l'Age Nucléaire". Qu'en est-il en France ? L'auteur de la présente brochure, physicien nucléaire sans vocation particulière pour le martyre (Gofman a finalement dû démissionner de l'AEC), écrit sous un pseudonyme. Tous les contacts privés ou autres qu'il a pu avoir avec des collègues ont été extrêmement décevants : indifférence, égoïsme, ignorance, toutes qualités humaines composantes de l'"Esprit (des) scientifique(s)" :

- 1 - Si on n'avait pas d'énergie, on ne pourrait pas faire nos expériences (en clair, on ne pourrait pas gagner notre croûte).
- 2 - Notre travail est avant tout la recherche. La recherche de la finalité de la recherche, c'est de la contestation !

3 - On n'y peut rien, Gofman et Tamolin vivent dans un pays où la communication entre gouvernants et gouvernés ne se limitent pas à des décrets d'une part et des manifs de l'autre. On serait des ex-physiciens nucléaires à la moindre déclaration publique, qui serait d'ailleurs proprement étouffée.

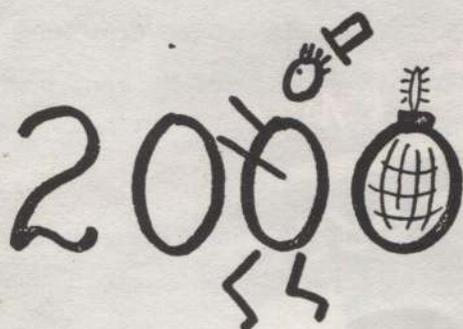
4 - Néel est pour ... Oui mais Alfvén et J. Rostand sont contre ... Rostand est un gauchiste!

Quelques mois avant l'invasion de 1940, et parce que nous ne livrions plus le fer lorrain, Paul Reynaud annonçait notre victoire prochaine sur l'Axe : "La route du fer est coupée !". Même après quatre années d'occupation, je garde un faible pour ce genre d'humour, permettez :

LA ROUTE DE L'ENERGIE EST OUVERTE !

"Répétons inlassablement qu'il n'existe pas de seuil de nocivité et que, par suite, toute exposition aux rayonnements, si légère soit-elle, augmente le taux de mutation et je m'empresse de souligner pour ceux qui ne sont pas avertis que le taux de mutation est, dans 99% des cas, synonyme de mutation à caractère monstrueux ou maladif."

Jean Rostand



CONCLUSION

Il n'y a pas de conclusion, le problème de la pollution en général et celui de la pollution radioactive en particulier ne fait que commencer. Cependant, comme le fait remarquer Robert Lattès dans la préface à "Halte à la Croissance", la marche vers la catastrophe a un rythme qui surprendra beaucoup de monde. Avant d'essayer de formuler une conclusion, peut-être ne serait-il pas inutile de poser correctement la question :

De l'énergie ? Pour qui ... et pour quoi ?

Dans le compte rendu d'un Congrès sur l'Energie Nucléaire^(*) un orateur signalait que les gens qui avaient besoin d'énergie électrique ne devaient pas croire qu'ils pourraient indéfiniment convaincre le voisin de construire le réacteur chez lui. Cette remarque est extrêmement juste, à court terme. Toutefois, compte tenu des besoins toujours croissants en énergie, il est bien évident qu'aucune parcelle de la Terre ne sera bientôt à l'abri de la pollution radioactive. Il est d'ailleurs amusant de constater que dans le même compte rendu et, apparemment sans provoquer de tollé, un autre conférencier (T.H. Pigford) a pu très innocemment faire le calcul suivant : "Si l'on suppose que le krypton et le tritium radioactifs des centrales nucléaires sont rejetés continuellement dans l'environnement par le futur ... on peut calculer la pollution mondiale résultante due aux centrales des USA. En supposant que la production mondiale de déchets radioactifs ne soit que 3 fois celle des USA ... le total de krypton-85 accumulé en l'an 2000 dans l'atmosphère de la planète sera encore supportable". Comment se fait-il, en effet, qu'un homme aussi éduqué se croie, ou croie les USA, autorisés avec 5% de la population mondiale à fournir 30% des déchets radioactifs de la planète ? Pas étonnant que la Science - Nouvelle Eglise Universelle - rencontre de plus en plus d'hérétiques.

L'énergie pour qui ? Essentiellement pour les riches et les nations riches, lancées dans la société de consommation et la fabrication des armements.

Energie pour quoi ? Des brosses à dents électriques, un cyclorameur électrique pour remuer la graisse de Monsieur, un vibromasseur électrique pour remuer la graisse de Madame, j'en passe et des meilleurs.

Sans compter les besoins artificiels imposés aux consommateurs impuissants : bananes pour les Finlandais, crèmes glacées au Sénégal, raisins de Californie en France et champagne à Tokyo. La pression psychologique des grandes concentrations urbaines qui explosent en période de vacances en une ruée vers des satisfactions tout aussi artificielles que le "confort" urbain. Un monde de riches progressivement transformés en spectateurs de leur propre vie, et dont la frustration est telle que, comme les Romains du "panem et circenses", aucun confort matériel, aucun spectacle ne peut leur ôter l'obsession de leurs besoins insatisfaits.

(*) 18ème Congrès des Sciences Nucléaires du 3 au 5 Novembre 1971 à San Francisco, USA.
Comptes Rendus dans IEEE Trans. on Nuclear Science, vol. NS-19, Fév. 1972.

Certes nous avons besoin d'énergie, un minimum ... démocratiquement réparti ! Mais, était-ce la peine d'épuiser les réserves mondiales de combustible fossile (charbon, pétrole, gaz) tellement plus utiles à la chimie ? Était-ce la peine de se jeter sur une source d'énergie aux avantages douteux — l'énergie de fission — tout simplement parce que l'invention du procédé étant réalisée, il faut en tirer le maximum de bénéfices tant qu'il est temps, ne serait-ce qu'en incitant les gens à surconsommer pour justifier la nécessité de telles centrales. Il n'est pas impossible que dans 20 ou 30 ans on ait une autre source d'énergie un peu moins polluante que celle-ci ; alors que, de la façon dont on s'y prend, il n'est pas impossible non plus que nous ayons pollué irrémédiablement l'environnement pour une poignée de gadgets électriques. A vrai dire, ces gadgets dont on nous abreuve ressemblent fort aux jouets qu'on refile vainement aux gosses pour avoir la paix.

D'une manière générale qui englobe tous les types de pollution, l'industrie n'a pas le "droit" de polluer du tout . Si elle le prend, il faut bien se rendre à l'évidence que c'est par la force et au détriment de tous. La fumée qui sort de la cheminée d'une usine ou l'eau sale déversée dans les rivières provoquent des malaises ou des empoisonnements - faibles ou non, directement ou indirectement - dans la population, qu'on a appelé le coût invisible des objets produits par cette usine. Si la consommation de l'eau minérale en bouteille a tant augmentée, c'est bien parce que l'eau de ville devient de plus en plus polluée, imbuvable et impossible à purifier et le sera encore davantage avec les déchets radioactifs. Bien entendu il est difficile dans le cadre de notre société de faire payer à chacun le coût réel des produits manufacturés. Il ne faut pas casser les reins de "notre" industrie qui travaille à plein rendement pour procurer à chaque adulte le gadget qui lui permettra de supporter l'état infantile dans lequel il est maintenu. Comme pour l'enfant, là liberté et la justice lui font défaut, mais en compensation il a une petite (ou une grosse) auto et des oranges en toutes saisons. Et cependant, malgré tous ces avantages et la Télévision d'un optimisme national à tout épreuve, les gens sont moroses. Pourquoi ?

L'homme a quatre ou cinq besoins fondamentaux qui ne coûtent pratiquement rien. La NOURRITURE : facile à obtenir dans un pays où le lapinisme n'est pas une religion d'Etat. Les BESOINS SEXUELS : faciles à satisfaire dans un pays où la frustration sous toutes ses formes n'est pas sciemment utilisée pour faire "marcher" le bon peuple. La JUSTICE SOCIALE : facile à obtenir dès l'instant où l'on se rend compte que la grosse voiture ou le manteau de fourrure ne sont que des substituts et des signes d'aliénation, plutôt que ceux d'une justice sociale qui vous serait bien répartie. La LIBERTÉ : facile également à obtenir dans un pays où la compétition individuelle, nationale et internationale n'est pas exacerbée par tous les moyens pour tirer le rendement maximum de chaque malheureux vivant, au risque de pousser la plupart à des actes répréhensibles pour se sortir du cycle infernal. Mon dernier besoin fondamental est le JEU, sous toutes ses formes : arts (y compris la recherche scientifique !) et sports. Lorsque les quatre autres besoins seront satisfaits, il nous faudra effectivement un peu d'énergie pour jouer, mais ce ne sera pas de l'énergie nucléaire.