

BROCHURE D'INFORMATION

**TOUT CE QUE VOUS AURIEZ PREFERE NE PAS AVOIR
A VOULOIR SAVOIR SUR CE QUI PEUT VOUS ARRIVER
ET QUE VOUS AIMERIEZ BIEN ALORS REUSSIR A EVITER
EN CAS DE CATASTROPHE NUCLEAIRE FRANCAISE OU VOISINE.**

Brochure diffusée avec l'approbation et le concours de :

Amis de la Terre, Fédération Française des Sociétés de Protection de la Nature, Greenpeace, Groupe Energie et Développement, Groupement de Scientifiques pour l'Information sur l'Energie Nucléaire....

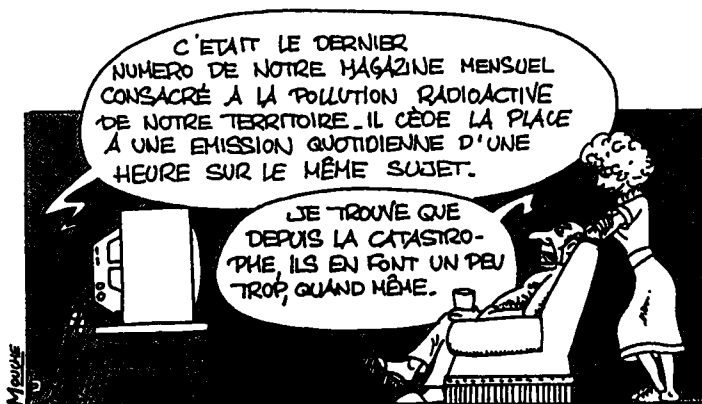
AVERTISSEMENT.

Vos enfants sont à l'école ; vous êtes à votre bureau, vous avez laissé les fenêtres entrouvertes en partant ce matin... quand vous apprenez que la catastrophe nucléaire est là. Le nuage radioactif arrivera dans quelques minutes, peut-être êtes vous déjà dedans.

Certes vous vous souvenez avoir parcouru il y a bien des années une brochure, celle-ci peut être, vous expliquant en long en large et en détails ce qu'est la radioactivité, comment s'en protéger, tout ce qu'il faut savoir pour s'en tirer le moins mal possible.

Oh, que c'est loin et flou dans vos souvenir ! Mon Dieu, que faire ? Que cachent les informations et les ordres qu'on commence à vous donner ? Est-ce que c'est comme à TCHERNOBYL ; vous trouvez-vous comme cette population d'Ukraine maintenue dans l'ignorance et qui vaqua passivement à ses affaires pendant plusieurs jours avant d'être évacuée, copieusement contaminée ?

Personne ne peut désirer vivre une telle situation. Mais ne pas vouloir est une chose, vouloir agir en est une autre. Cette courte brochure n'a pas d'autre ambition que, par une information de base, écrite pour le plus grand nombre, montrer que nous pouvons affronter le risque nucléaire et, peut-être, si nous le voulons, nous en débarrasser et libérer ainsi l'avenir pour nos enfants.



"Du savoir procède la capacité d'agir ; la capacité d'imposer également."

P. LAGADEC, "La civilisation du risque", Le Seuil (1980).

"Du point de vue de la santé mentale, la solution la plus satisfaisante pour l'avenir des utilisations pacifiques de l'énergie atomique serait de voir monter une nouvelle génération qui aurait appris à s'accommoder de l'ignorance et de l'incertitude."

ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTE, Rapport N° 151, Genève (1958).

INTRODUCTION : pourquoi cette brochure ?

Plus que partout ailleurs dans le monde, l'Etat français a lié son destin et celui du pays au développement de la force et de l'énergie atomiques. Quel que soit le degré d'adhésion de chacun aux valeurs du nucléaire, tous sont appelés à en payer le prix et à en consommer les effets, utiles ou nuisibles.

Parmi ces derniers, le plus terrible en temps de paix est sans conteste l'"accident majeur" parce que ses conséquences sont catastrophiques et pour une grande part incontrôlables. Le drame de TCHERNOBYL a donné un contenu concret à ce concept et désormais chacun sait qu'avec le nucléaire les malheurs de la guerre peuvent frapper par surprise en temps de paix :

- des hommes vont à la mort en service commandé pour contenir le déferlement de la radioactivité ;
- toutes les institutions sont prises de court ;
- des villes entières sont évacuées ;
- des centaines de milliers d'enfants sont séparés de leurs parents ;
- d'immenses richesses sont perdues ou durablement dégradées ;
- les biens les plus vitaux, l'air, l'eau, la nourriture, la terre, deviennent suspects ;
- des centaines de milliers d'êtres humains plus ou moins contaminés et irradiés vont vivre dans l'angoisse du lendemain.

Et, moindre mal est-on forcé de dire, l'accident de TCHERNOBYL n'est pas le pire qui soit concevable : le réacteur fonctionnait à faible puissance, l'accident n'est pas survenu au début ou au coeur d'une nuit d'hiver, le vent semble avoir éloigné et dispersé une grande partie de la radioactivité, les autres réacteurs sont restés sous contrôle. Pourtant, même limitée, cette catastrophe a affecté à divers degrés de vastes territoires et touché de nombreuses populations dans plusieurs pays d'Europe. Et, bien

que rien de visible ne se soit passé, tous ont appris que personne ne pouvait se considérer comme totalement à l'écart ou à l'abri.

Par ailleurs les deux derniers plus graves accidents de centrales nucléaires, à THREE MILE ISLAND en Pennsylvanie (USA) le 28 mars 1979 et à TCHERNOBYL en Ukraine (URSS) le 26 avril 1986, ont affecté des installations récentes, mettant en oeuvre des techniques éprouvées et considérées comme particulièrement sûres. Aucune oeuvre humaine n'est exempte de défauts, aucun opérateur humain n'est infailible. Aussi, bien que rares, de tels événements peuvent se reproduire dans n'importe quelle centrale ou usine nucléaire, n'importe quand.

Dans une telle éventualité, la pollution radioactive se répandra dans l'environnement et le contaminera de manière plus ou moins importante selon la forme et la quantité des rejets, selon la distance à l'émission et selon les conditions météorologiques.

Trois ensembles de conditions doivent être remplis pour que chacun puisse limiter au maximum, pour lui et pour ses proches, les dommages encourus :

- être informé immédiatement et précisément ;
- connaître les risques et comprendre ce qui se passe ;
- avoir un comportement adapté.

Nous allons développer ces thèmes, en commençant par présenter les informations de base sur la radioactivité rejetée par un accident, ses différentes formes, son devenir dans l'environnement et ses effets sur la vie. Ayant compris cela nous pourrions alors faire un tour d'horizon des problèmes pratiques que pose la présence de pollutions radioactives dans l'environnement et les façons de s'en protéger.

Enfin, et par voie de conséquence nous saurons quelles informations sont nécessaires pour que notre connaissance de ces choses serve pleinement.

On pourra objecter que ce document fait double emploi avec celui distribué sous le titre "CONSIGNES

DE SECURITE" aux personnes habitant au voisinage des sites nucléaires. En fait non, et pour plusieurs raisons.

D'abord la pollution ne s'arrêtera pas à la limite des jardins et des champs des zones où il a été diffusé. Ensuite, comme son titre l'indique, il ne contient que des "consignes" correspondant à un petit nombre de situations dans lesquelles tout le monde ne se trouvera pas forcément au moment d'un accident. Par ailleurs il ne fait aucune place à la prévention et à l'intelligence, conseillant pour l'essentiel d'attendre les ordres officiels ; ce qui suppose un fonctionnement impeccable des pouvoirs publics et de leur système d'information, hypothèse contredite par l'expérience aussi bien à THREE MILE ISLAND qu'à SEVESO, BHOPAL, TCHERNOBYL ou lors des naufrages successifs du TORREY CANON, de l'AMOCO CADIZ, du TANYO le long des côtes de la Bretagne. Enfin, dans le "louable" souci de ne pas soulever d'inquiétude, il prend la liberté de diffuser des informations édulcorées, voire erronées.

Seule une population consciente, informée et préparée peut résister au sentiment d'angoisse et de panique qui de toutes façons l'étreindra à la nouvelle d'un accident grave dans une usine nucléaire proche. La solution pour les pouvoirs publics, promoteurs du nucléaire et de ses risques, a toujours été de nier la possibilité pratique d'une telle catastrophe. Et nous pouvons hélas parier que même après TCHERNOBYL ils continueront ainsi. Cette attitude est irresponsable et intolérable car elle prouve que peu leur chaut de réduire au maximum les conséquences d'un drame de cette ampleur. Nous savons trop bien que l'ignorance et la négligence transformeront un accident local en catastrophe régionale, puis la catastrophe régionale en désastre national. Nous avons donc décidé d'informer.

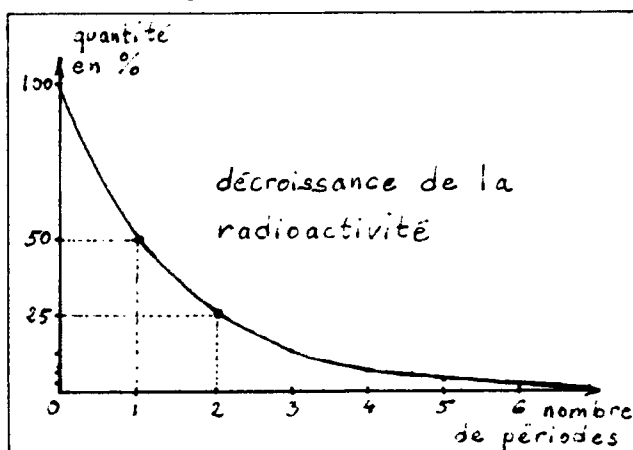
Mais en aucune façon la lecture de cette brochure ne saurait suffir. Nous l'avons conçue pour que le plus grand nombre prenne conscience de l'absolue nécessité dans laquelle se trouve notre société de regarder le risque nucléaire et de l'affronter résolument. C'est une invitation à la lucidité et à l'engagement. Puisse chacun se mobiliser, à son niveau, selon ses responsabilités, avant qu'il ne soit trop tard.

I. LA RADIOACTIVITE : natures, origines, cheminements et effets sur la matière et sur la santé.

I.1. La radioactivité, qu'est-ce que c'est ?

Les atomes qui composent la matière sont constitués d'un noyau entouré d'un nuage d'électrons. Le noyau comprend des protons, en nombre égal à celui des électrons, et des particules neutres, les neutrons. Les propriétés chimiques d'un élément ne dépendent que de ses électrons.

La radioactivité est la propriété que possède le noyau de certains atomes instables de se désintégrer à un moment donné de son existence. L'instant de cette désintégration n'est pas prévisible : il n'est connu qu'en probabilité. La valeur que prend cette probabilité est constante pour chaque variété d'atome. Elle s'exprime conventionnellement par la durée, appelée "période" ou "demi-vie", à l'issue de laquelle la moitié d'une quantité donnée d'une variété atomique radioactive (on dit aussi "variété isotopique") s'est désintégrée. Au bout de deux périodes il n'en restera donc que la moitié de la moitié, soit le quart, etc.



La période de désintégration est très variable selon les variétés isotopiques, par exemple :

3 minutes pour le Brome 84 ; 8,06 jours pour l'Iode 131 ; 30 ans pour le Césium 137 ; 1 600 ans pour le Radium 226 ; 24 400 ans pour le Plutonium 239 et 17 millions d'années pour l'Iode 129.

On remarque qu'un même élément chimique, comme l'iode, peut avoir plusieurs variétés isotopiques radioactives (ou stables également), avec des périodes très différentes. On a donc besoin de connaître la variété isotopique d'un polluant radioactif pour évaluer le risque qu'il représente.

Tout atome radioactif est donc appelé à disparaître. C'est pourquoi la radioactivité de notre planète n'a cessé de décroître depuis sa formation jusqu'au début de l'âge atomique, il y a un peu plus de quarante ans.

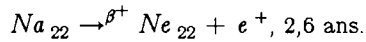
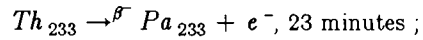
La radioactivité se chiffre en Curie (Ci), ancienne unité qui correspond à l'activité d'un gramme de

Radium 226 (37 milliards de désintégrations par secondes), et en Bécquerel (Bq), nouvelle unité qui vaut une désintégration par seconde. La première est plus pratique pour chiffrer les grandes quantités de radioactivité régnant dans une installation nucléaire ou libérées par un accident, alors que la seconde convient mieux pour décrire la pollution de l'environnement (on parle alors de Bq/m^2 , Bq/m^3 , Bq/kg ou Bq/l). Le passage de l'une à l'autre s'effectue très simplement en multipliant par 37 milliards quand on convertit les Ci en Bq et en divisant par la même valeur pour l'opération inverse.

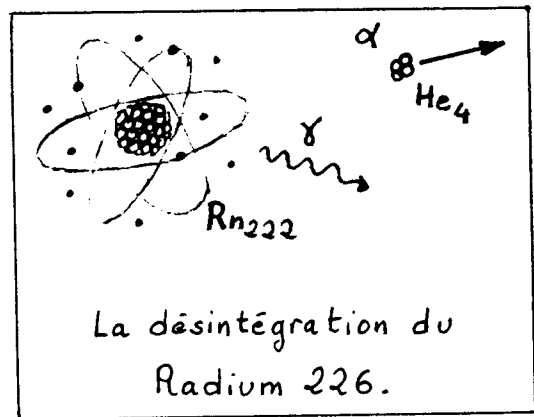


Plomb 206, stable, après une cascade de désintégrations α et β ;

- la désintégration bêta (β) correspond à l'émission d'un électron négatif ou positif (appelé alors positron), suivant que le noyau est trop ou pas assez chargé en neutrons. Par exemple :



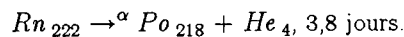
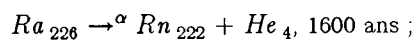
Par ailleurs, lors d'une désintégration une certaine quantité d'énergie, toujours la même pour un atome instable donné, est emportée sous forme cinétique par la particule émise. Plus la particule est lourde et sa vitesse élevée et plus l'énergie est importante, tout comme pour n'importe quel projectile. De plus il arrive qu'après une désintégration le noyau se trouve dans un état dit "excité", c'est à dire qu'il contient trop d'énergie pour être stable. Il libère alors cette énergie sous forme d'un photon gamma (γ), un rayonnement électromagnétique de même nature que la lumière ou les rayons X, mais beaucoup plus énergétique et donc pénétrant.



I.2. Les différents modes de désintégration.

La désintégration d'un noyau atomique instable peut s'effectuer selon plusieurs modes :

- la désintégration alpha (α) correspond à la coupure en deux morceaux du noyau. Le morceau le plus léger est un noyau d'hélium, un gaz rare stable. Par exemple :



Cet exemple montre que le produit d'une désintégration n'est pas toujours un atome stable. Les deux réactions mentionnées font partie de la chaîne naturelle de désintégrations qui part de l'Uranium 238 de période 4,5 milliards d'années pour aboutir au

Nous retiendrons que la radioactivité est une libération d'énergie qui se manifeste par l'émission d'une particule, expulsée du noyau comme la balle du fusil, éventuellement accompagnée ou suivie par un rayonnement. Alors qu'en chimie les réactions mettent en jeu des énergies de quelques électron-volt (eV) par liaison, en radioactivité les chiffres s'échelonnent entre la dizaine de milliers (10 keV) et plusieurs millions (MeV) d'électron-volt. C'est pourquoi, dès sa découverte, l'énergie atomique a fasciné les chercheurs, par les valeurs inouïes qu'elle met en jeu.

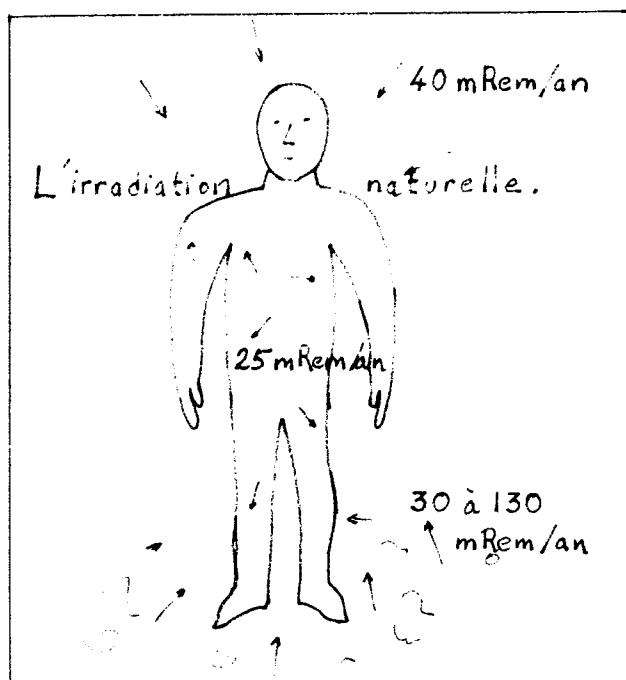
I.3. Origines de la radioactivité, radioactivités naturelle et artificielle.

La radioactivité naturelle à laquelle est soumis le corps humain a trois origines, deux externes et une interne :

- les rayons cosmiques qui sont constitués de particules provenant de l'espace intersidéral ; ils contribuent pour 40 mRem/an au niveau de la mer (100 mRem/an à 3000 mètres d'altitude) à l'irradiation du corps humain ;
- le rayonnement terrestre dû aux radio-éléments naturels présents dans les roches, tels l'uranium, le thorium et leurs descendants par désintégration ; il produit de 30 à 130 mRem/an selon la nature du terrain
- l'irradiation interne, environ 25 mRem/an à partir du Potassium 40 et du Carbone 14 fixés dans l'organisme et des radons 220 et 222, ainsi que leurs descendants, absorbés par inhalation.

Nous reviendrons plus loin sur la signification de l'unité d'irradiation, le mRem (milli-Rem).

Malgré son intensité très réduite la radioactivité naturelle ne saurait être sans effets sur la matière vivante. Certains pensent qu'elle est responsable de quelques centaines de cancers par an dans notre pays, notamment dans les régions uranifères, où les eaux de source sont naturellement très chargées en radium et en radon.



La radioactivité artificielle vient s'ajouter à la radioactivité naturelle. Elle a deux origines princi-

pales :

- les explosions nucléaires atmosphériques et sous-marines, interdites depuis 1963 à cause des risques que leurs retombées font courir à l'humanité, mais néanmoins pratiquées jusqu'en 1973 par la France et 1984 par la Chine ;
- les rejets des centrales nucléaires et des usines de retraitement des combustibles ; il faut aussi mentionner ici l'extraction de l'uranium car, bien que ce ne soit pas à proprement parler une source de polluants radioactifs artificiels, les quantités libérées sont sans commune mesure avec celles que les gisements laissent filtrer naturellement dans l'environnement.

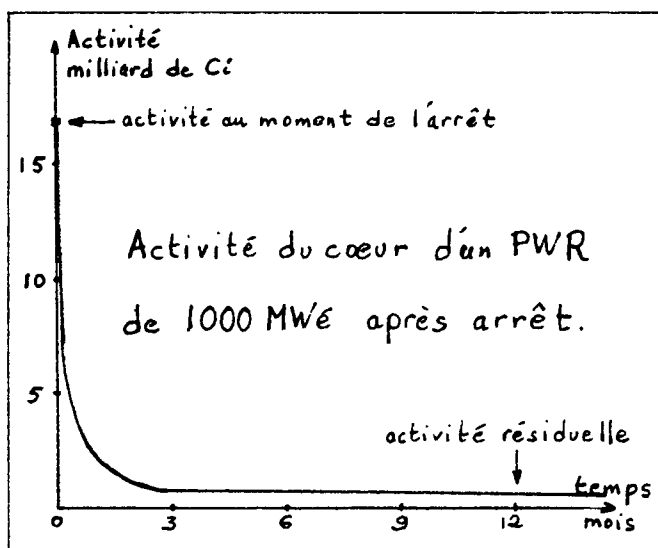
Ce dernier point mis à part, la radioactivité artificielle, stricto sensu, provient à plus de 99% des produits de la fission de l'uranium 235 et du plutonium 239 (voir encadré), le pourcent restant étant réparti entre l'uranium et le plutonium non fissionnés et les "matériaux d'activation". Ces derniers se trouvent dans les constituants même des bombes et des réacteurs, devenus radioactifs sous l'effet des flux de neutrons engendrés par les réactions nucléaires de fission (dans les réacteurs et dans les bombes) et de fusion (jusqu'à aujourd'hui uniquement dans les bombes). Par exemple le Sodium 22 (Na_{22}) est un produit d'activation du sodium servant au refroidissement des réacteurs, dits-surgénérateurs, PHENIX et SUPERPHENIX.

Lors d'un essai nucléaire atmosphérique, une bonne partie de la radioactivité est entraînée par effet de cheminée dans la haute atmosphère et, dispersée au gré des vents, retombe progressivement à la surface de la terre.

En revanche, en marche normale, les usines nucléaires ne laissent échapper qu'une fraction très petite, environ un millionième par an, de la colossale quantité de radioactivité qu'elles renferment. Pour fixer les idées, un réacteur nucléaire de 1000 MWé, il y en a l'équivalent de 40 en France, contient en régime stabilisé une radioactivité de 17 milliards de Ci, soit plus de mille fois celle des retombées de la bombe d'Hiroshima.

Après l'arrêt d'un réacteur, la radioactivité décroît d'abord rapidement puis, au delà de deux mois, beaucoup plus lentement. Lors de la première phase l'énergie dégagée par les désintégrations est telle qu'il faut continuer à refroidir fortement le réacteur, à défaut de quoi un grave accident se produit, comme à THREE MILE ISLAND et à TCHERNOBYL.

Les usines de retraitement accueillent l'activité résiduelle des réacteurs, puisqu'on y transporte les



combustibles nucléaires usés plusieurs mois après leur déchargement. Mais, comme on y manipule et on y stocke, parfois sous des formes très vulnérables, des dizaines, voire des centaines de ces activités résiduelles, la menace radiologique potentielle qu'elles font peser n'est guère moindre que celle d'une centrale nucléaire. Trois grandes usines sont exploitées sur le territoire de la CEE, deux en France, La Hague et Marcoule, et une en Grande-Bretagne, Windscale rebaptisée depuis peu Sellafield.

Nous disposons maintenant des informations de base nécessaires pour comprendre les caractères déroutants de la radioactivité et de la pollution radioactive artificielle :

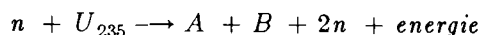
- des libérations d'énergie élémentaires énormes, ce qui fait que des masses faibles (quelques kilogrammes de retombées radioactives pour une bombe atomique) représentent un risque radiologique formidable. C'est pourquoi les concentrations dangereuses de radioactivité dans l'air ou l'eau sont, quantités impondérables, incolores, inodores et sans saveur. On ne peut les détecter qu'au moyen d'instruments de mesure (nous y reviendrons plus loin) ;

- une grande variété de formes chimiques évoluant au fil des désintégrations successives, chaque forme demandant a priori à être étudiée quant à son comportement dans l'environnement et aux diverses façons selon lesquelles elle peut contaminer les espèces vivantes. De ce point de vue là, les comparaisons avec la radioactivité naturelle, quand elles sont basées sur les seules intensités de rayonnement, sont hasardeuses, sinon suspectes. La complexité des phénomènes en jeu est extrême, ce dont nous donnerons un aperçu dans les chapitres suivants.

FISSION DE L'ATOME ET RADIOACTIVITE.

$$E = mc^2$$

A la recherche d'une application pratique de la fameuse formule d'Einstein exprimant l'équivalence entre masse et énergie (1 gramme = 25 millions de KWh), les physiciens découvrirent la réaction en chaîne de fission de l'uranium 235 puis du plutonium 239. Cette réaction peut se schématiser par l'équation (n représente un neutron) :



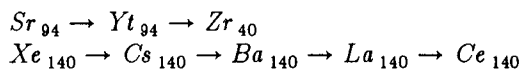
où, par exemple, A = strontium 94 (1,3 minutes) et B = xénon 140 (16 secondes).

L'énergie libérée s'exprime en dizaines de MeV par fission et correspond à la différence entre les masses initiale ($n + U_{235}$) et finale ($A + B + 2n$). Comme lors des désintégrations elle se manifeste sous forme cinétique et de rayonnement γ .

Un point peut poser question aux non-spécialistes : d'où provient la chaleur intense dégagée par les fissions nucléaires ? Tout simplement des chocs de ces minuscules projectiles entre eux et avec la matière environnante, ce que l'on peut se représenter en pensant à la balle de plomb qui fond au moment de son impact sur un mur de béton ou à l'échauffement que l'on ressent dans les mains quand on applaudit un peu longtemps.

L'intérêt de la fission de l'uranium et du plutonium tient à ce qu'elle produit plus de neutrons qu'elle n'en consomme, environ deux à trois fois plus. Aussi peut-on exploiter le phénomène pour déclencher une réaction explosive, en disposant la matière fissile de telle sorte que tous les neutrons émis, ou presque, déclenchent d'autres fissions : c'est la bombe atomique. Mais, qui peut le plus peut le moins, on peut s'arranger pour juste entretenir le rythme des fissions à une valeur donnée et contrôler ainsi la puissance émise : c'est ce qui se passe dans un réacteur nucléaire en fonctionnement normal.

Les atomes A et B (parfois la fission produit trois fragments) sont radioactifs. Chacun d'entre eux donne naissance à une chaîne de désintégrations. Pour l'exemple donné ci dessus ces chaînes sont :



Ces corps sont appelés produits de fission. Ils se répartissent selon diverses variétés isotopiques de divers élément chimiques, en tout une centaine, qui donnent naissance à autant de chaînes de désintégrations.

Les produits de fission n'étaient plus présents dans la nature depuis des milliards d'années. En les réintroduisant dans l'environnement l'homme enclenche des phénomènes nouveaux et complexes dont l'étude est loin d'être achevée :

- cheminement dans l'atmosphère et dans le cycle de l'eau ;
- comportement géo-chimique ;
- absorption, dilution, concentration et transport par les organismes vivants.

I.4. Rejets accidentels de radioactivité.

On peut distinguer deux sortes d'essais nucléaires atmosphériques, les essais "exclusivement atmosphériques", parce qu'effectués à une altitude suffisante pour qu'aucun produit de fission ne vienne se mêler à la poussière soulevée par le souffle de l'explosion, et les autres, ceux que l'on dit "sales".

La différence majeure entre les retombées des essais "exclusivement atmosphériques" et celles provoquées par les autres ou par des accidents dans une centrale ou une usine de retraitement tient au processus de dispersion. Pour les premières la dispersion est maximale et les conséquences s'en trouvent diluées et accessibles seulement aux statistiques sur le long terme au sein de la population planétaire. Les essais sales et les accidents nucléaires posent au contraire des problèmes aigus sur des aires plus limitées.

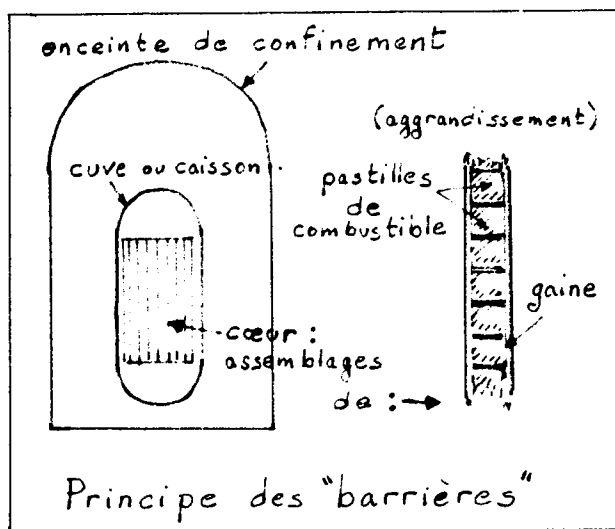
La composition d'un rejet accidentel de radioactivité dans l'environnement dépend de l'installation nucléaire concernée et du déroulement de l'accident.

Comme on l'a vu, s'il s'agit d'une usine de retraitement, on ne trouvera que des isotopes de période moyenne ou longue, puisque les matières radioactives qui y sont manipulées ont pour origine des combustibles usés sortis de réacteur depuis plusieurs mois sinon plusieurs années. Il n'y aura donc ni Iode 131, ni Tellure 133 (3,25 jours), mais essentiellement du Strontium 90 (28,5 ans), du Césium 137 (30 ans) et des transuraniens, tels que le neptunium ou le plutonium, dont les périodes vont de quelques dizaines à quelques millions d'années.

Dans le cas d'un accident de centrale il faut considérer la durée entre l'arrêt du réacteur et l'instant où commence le rejet ainsi que les phénomènes physico-chimiques (explosion, incendie) et/ou nucléaires (réaction en chaîne incontrôlée, désintégrations) qui en sont à l'origine.

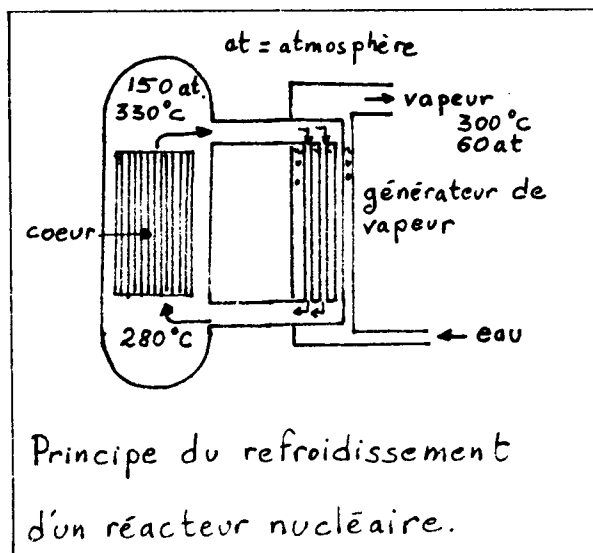
Sauf incendie de déchets radioactifs métalliques, explosion de solvants organiques, destruction brutale de grands stocks de produits de fission en solution on conçoit difficilement qu'un accident dans une usine de retraitement puisse envoyer dans l'atmosphère de très grandes quantités de matières radioactives. Et même alors le nuage radioactif serait nettement plus réduit que celui que peut provoquer un accident de réacteur. Ce qui ne veut pas dire que le danger serait à négliger : ce serait une vraie catastrophe, simplement, peut-être, d'un degré un peu moindre. Aussi, aux réserves sur la composition et la quantité des émissions radioactives près, ce que nous allons décrire maintenant quant aux conséquences des accidents de centrale s'applique pour les usines de retraitement.

Un accident de réacteur est potentiellement catastrophique si, à un moment donné, le fluide de refroidissement trouve une brèche vers l'extérieur. Tout dépend alors du comportement du combustible et de son gainage et, s'il y en a une, de la tenue de l'enceinte de confinement. Sauf pour ce qui concerne les réacteurs surgénérateurs, il est très improbable qu'un accident grave débute par une destruction du combustible. Celle-ci a en effet toutes les chances de découler d'une rupture ou d'une panne irrémédiable du système de refroidissement.



Tant que les gaines ne sont pas endommagées, et dans l'hypothèse où on a perdu le confinement ou qu'on en n'a pas, seuls les gaz radioactifs polluant le fluide de refroidissement seront rejetés, ainsi que quelque infime fraction des produits d'activation (Cobalt 60 par exemple), ceux qui auront été entraînés par érosion et corrosion durant l'exploitation antérieure de l'installation.

Si arrivé à ce stade le processus est maîtrisé, les conséquences resteront minimales ; simplement l'alerte



aura été très chaude.

Dans le cas contraire la situation dégénère très vite : la température monte jusqu'au point où le métal constituant les gaines s'enflamme en dégageant une chaleur considérable et, en présence d'eau, de l'hydrogène. C'est ce qui s'est produit à THREE MILE ISLAND et à TCHERNOBYL. L'hydrogène peut alors former un mélange détonant avec l'air du bâtiment réacteur. A THREE MILE ISLAND ce bâtiment, conçu comme enceinte de confinement, a résisté à l'explosion, ce qu'on ne pouvait attendre du simple hall d'usine où était disposé le réacteur numéro 4 de TCHERNOBYL.

D'autres sortes d'incendie peuvent initier ce genre d'accident, incendie de graphite dans un réacteur modéré au graphite, incendie de sodium dans l'air ou dans l'eau dans un réacteur surgénérateur, incendie de câblerie électrique à la suite d'un court-circuit ou d'une imprudence etc.

Les rejets sont formés de gaz et d'aérosols, fines poussières radioactives en suspension dans l'air. Leur composition dépend essentiellement de la température atteinte par le combustible pendant l'accident. Les gaz, iode, tellure, gaz rares, sont libérés les premiers, puis suivent les métaux ou les composés les plus volatils, comme le césium. A plus haute température commenceront les émissions de strontium, de baryum et enfin, si on arrive à la fusion du combustible, au delà de 2200 degrés, une partie des transuraniens sera aussi rejetée, c'est à dire du plutonium, du neptunium, de l'américium etc. La composition des rejets donne des indications sur ce qui s'est passé, ce qui est d'autant plus précieux que les instruments de mesure sur le site, placés pour détecter des fuites bénignes, ont été complètement saturés comme un pèse-lettres sous le

poids d'un éléphant...

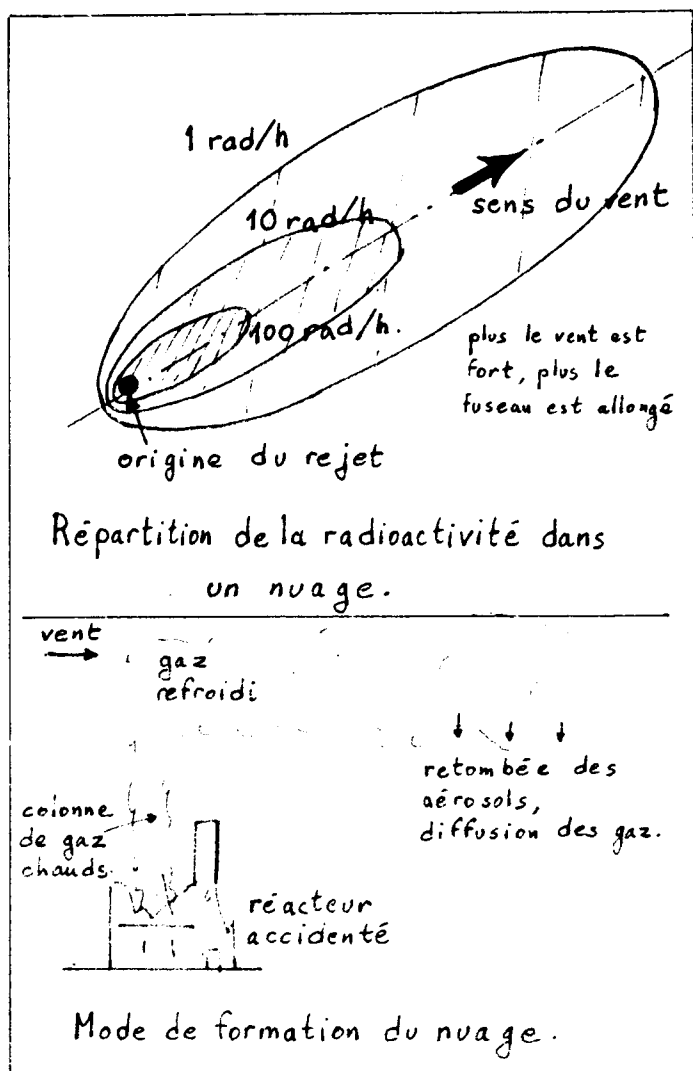
On touche ici du doigt le point faible du système de décision, l'absence de données précises sur la quantité de radioactivité rejetée. On imagine la tentation qui s'empare tout naturellement des responsables de ne pas prendre les décisions ultimes : la mobilisation des grands moyens et l'évacuation des populations ; d'autant plus que la doctrine qui prévaut depuis toujours est de nier la possibilité d'un désastre, minimiser le risque radiologique et de ridiculiser ceux qui prennent des précautions de leur propre chef.

Tétanisés par l'enjeu, ces responsables préfèrent chasser de leur esprit les conseils suggérés par le bon-sens et attendre que les chiffres leur dictent les mesures à prendre, sans considération pour les précieuses minutes, les précieuses heures qu'ils font ainsi irrémédiablement perdre aux populations, durant lesquelles elles pourraient se protéger avant qu'il soit trop tard, prendre des dispositions pour limiter les dégâts, bref prévenir pour ne pas avoir trop à subir, car pour ce qui est de guérir ...

I.5. Cheminements de la radioactivité dans l'environnement.

Bien que le lieu où se produit le relâchement de radioactivité soit situé le long d'un cours d'eau ou en bordure de mer, la pollution emprunte d'abord une voie aérienne. Les gaz et les aérosols radioactifs se mêlent à l'air pour former un nuage invisible qui va se déplacer au gré des mouvements de l'atmosphère. Plus la hauteur où s'effectue le relâchement est grande, plus forte est la température des rejets, plus faible est le vent et plus le nuage s'élèvera haut dans le ciel. A TCHERNOBYL l'incendie de graphite a permis au nuage de monter, semble-t-il, jusqu'à quelques 3000 mètres. On estime qu'un relâchement à 100° C. , par vent faible, monterait à 300 mètres environ.

La forme du nuage est d'autant plus allongée que la vitesse du vent est grande. Mais il faut bien se persuader qu'il n'y a pas d'"optimum" en pareille matière : si le vent souffle faiblement la pollution sera extrêmement élevée dans la région autour de l'usine accidentée ; si au contraire il souffle violemment, la radioactivité balaiera rapidement un vaste territoire. L'intensité de la radioactivité au sein du nuage décroît de l'axe vers la périphérie et, selon cet axe, quand on s'éloigne de la source. Elle diminue aussi au cours du temps du fait de deux phénomènes, d'une part les désintégrations nucléaires dont nous avons déjà parlé et de l'autre le dépôt progressif des aérosols.



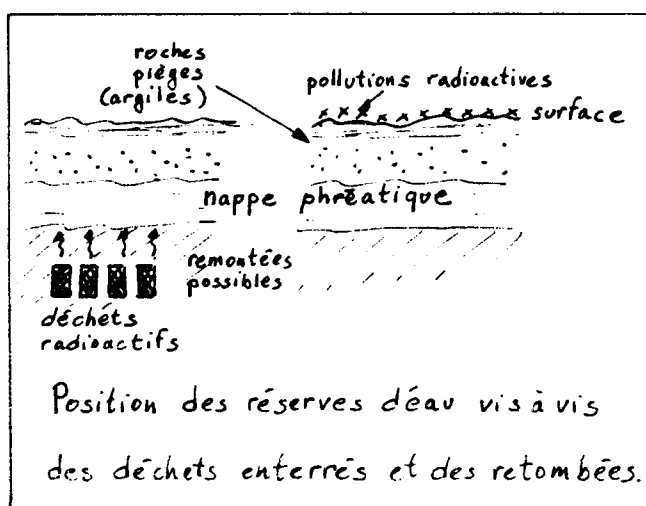
laver une salade pour éliminer la radioactivité qui adhère à ses feuilles après le passage du nuage. Profondément incrustées (on dit adsorbées) dans les irrégularités de surface, les poussières radioactives résistent aux lavages répétés. Plus généralement ces particules iront se fixer préférentiellement dans les recoins et sur les surfaces grasses et humides. C'est pourquoi on conseille aux personnes qui ont été touchées par un nuage fortement radioactif de se laver les cheveux et de se savonner soigneusement. Les travailleurs du nucléaire savent combien sont pénibles, quand elles sont sérieusement effectuées, les douches et frictions de décontamination ... ; la peau adsorbe aussi bien sinon mieux qu'une feuille de laitue !

L'intensité des retombées est donc maximale par temps de brouillard, de pluie ou de neige. Chaque gouttelette d'eau, chaque flocon de neige "récolte" littéralement tous les aérosols du voisinage, semble les aspirer même, pour aller les déposer sur le sol, les cours d'eau, les lacs, la végétation, les véhicules, les habitations, les réservoirs à ciel ouvert etc. Sans oublier que l'iode et le tellure se dissolvent en grande partie dans ces gouttes d'eau et accroissent ainsi l'activité des dépôts. Ensuite le ruissellement entraînera une partie de cette radioactivité vers le réseau hydrographique de surface et une autre dans le sol. Mais il restera une radioactivité fixée par la couche superficielle du sol, qui peut être remise en suspension dans l'air par temps sec et venté. Elle peut également être transférée dans les végétaux via l'action de bactéries. Si sa concentration est dangereuse on devra retirer cette couche superficielle et la stocker comme un déchet nucléaire, tâche titanesque. A la limite, si la couche concernée est épaisse et très polluée, on condamnera l'accès à la zone.

Les migrations des radio-éléments dans le sol sont en général très lentes, plus lentes que celles de l'eau qui les transporte, à cause de multiples réactions physico-chimiques avec les roches traversées. Les nappes d'eau un peu profondes restent indemnes et peuvent servir de ressources sûres pendant longtemps, sinon toujours, même après une pollution de surface importante en regard du risque radiologique pour l'homme. Notons cependant que cette analyse ne vaut pas pour les déchets radioactifs enterrés (remarque destinée à éviter que ce passage ne soit abusivement exploité pour "vendre" des stocks de déchets radioactifs souterrains). En effet, un stock de déchets radioactif constitue une masse concentrée de polluants potentiellement directement au contact des eaux souterraines.

La vitesse de ce dépôt dépend de leur finesse (laquelle est d'autant plus grande que la température atteinte par le combustible nucléaire a été élevée), de la vitesse du vent et de la rugosité du sol. Les choses se passent comme pendant une chute de neige : s'il n'y a pas ou très peu de vent, la rugosité ne joue aucun rôle et la neige tombe droit pour former un tapis régulier ; au contraire si le vent souffle, elle vole et s'accumule contre les obstacles et dans les creux où elle forme des congères. Ceux qui n'ont jamais observé cela peuvent penser à la manière dont la poussière se répartit dans une pièce : là où l'air ne circule pas, le long des murs et dans les recoins. Mais ce ne sont là qu'images imparfaites.

D'abord la vitesse de chute n'excède pas un centimètre par seconde. Ensuite les désintégrations électrisent les aérosols et leur voisinage immédiat, d'où la fâcheuse tendance des premiers à venir se coller partout et assez fortement. Par exemple, contrairement à ce qui a parfois été dit, il ne suffit pas de



C'est autour de l'installation accidentée que la menace sur le réseau hydrographique est maximale car aux retombées massives s'ajoute l'éventualité d'un contact direct de la source de radioactivité avec le sol et le sous-sol. Des actions de sauvegarde urgentes doivent être entreprises sans délai, dont l'organisation est du ressort des pouvoirs publics.

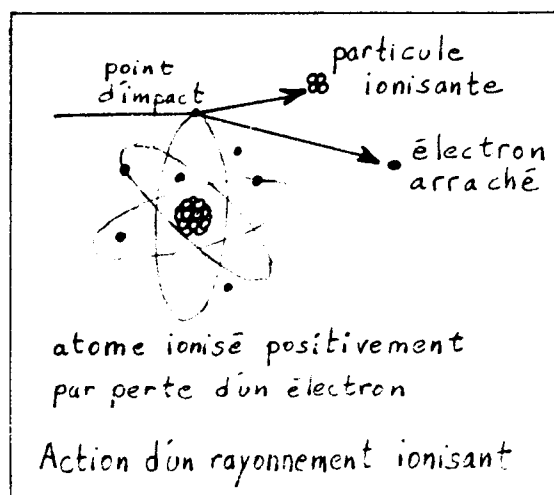
La définition des interventions n'est pas forcément évidente car la situation n'est pas parfaitement tranchée : il n'y a pas de frontières nettes, ni dans le temps, ni dans l'espace, entre zone critique, zone gravement touchée, zone à risque radiologique important, zone préoccupante, zone faiblement atteinte. En particulier, ce n'est pas parce que la radioactivité de l'air redevient proche de la normale ou n'a pas atteint une valeur très élevée que l'on doit en conclure que le risque radiologique est faible : ce qui est significatif pour l'avenir, c'est la quantité et la nature des radio-éléments déposés pendant le passage du nuage, et ce d'autant plus que chacun se sera correctement protégé durant la première phase de la catastrophe.

I.6. Action des rayonnements ionisants sur la matière.

Rappelons que la matière est composée d'agencements d'atomes liés par la mise en commun de certains de leurs électrons, agencements appelés molécules.

Un atome est dit ionisé quand le nombre des électrons qui gravitent autour de son noyau n'est pas égal au nombre de protons que ce dernier contient. Un atome ionisé peut provoquer une modification chimique irréversible de la molécule dont il est un constituant, et parfois donner naissance à un ou

plusieurs "radicaux libres" qui prolongeront son action destructrice à d'autres molécules. L'ionisation provoque donc des désordres de nature chimique dans la matière, et notamment dans les tissus biologiques. C'est pourquoi il n'existe pas de seuil physique aux effets des rayonnements ionisants sur la matière vivante.

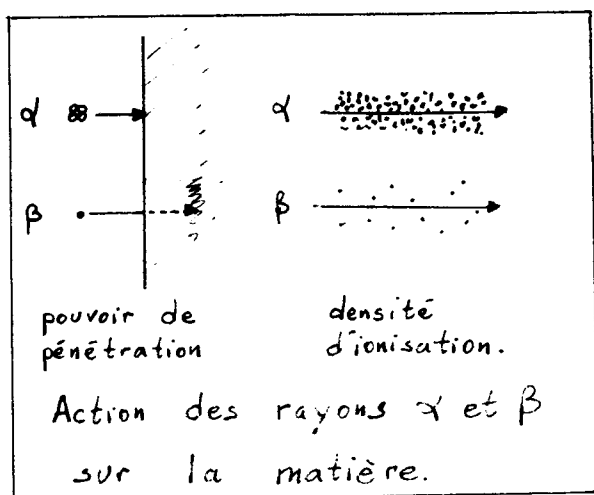


Le pouvoir ionisant d'un rayonnement dépend de son énergie et de sa capacité de pénétration. Il exprime son aptitude à arracher des électrons aux atomes qu'il "frôle", c'est à dire à casser des molécules en une paire d'ions, morceaux de molécule ionisés.

Les particules lourdes, des noyaux d'hélium, constituant le rayonnement α ne peuvent guère traverser plus de quelques centimètres d'air ; une feuille de papier à cigarette constitue un blindage suffisant contre eux. Cependant leur pouvoir ionisant est énorme : de 3000 à 6000 paires d'ions par millimètre d'air parcouru.

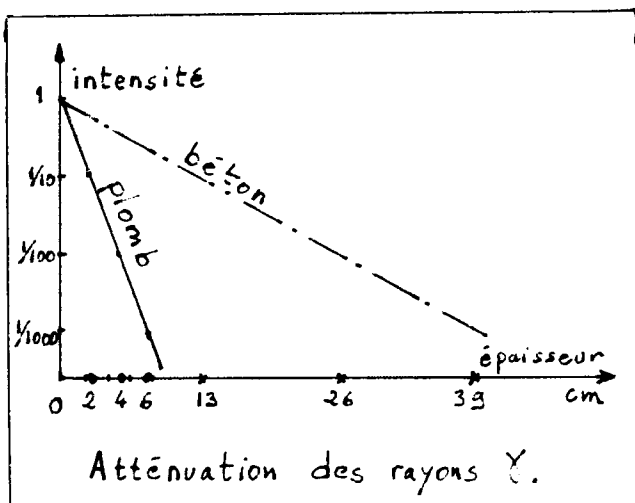
Les particules légères constituant le rayonnement β , des électrons ou des positrons 7300 fois moins lourds que les noyaux d'hélium, ont un pouvoir de pénétration plus élevé, quelques millimètres dans les solides et jusqu'à quelques mètres dans l'air. Leur pouvoir ionisant est donc plus faible, 5 à 40 ionisations par millimètre d'air.

En revanche les rayons X et γ , composés de photons de grande énergie, se propagent beaucoup plus loin. Un photon ionise la matière de façon indirecte, par l'intermédiaire d'un choc avec un électron ou, si son énergie est suffisante, avec un noyau. Il agit donc par arrachement d'un électron ou par formation d'une paire positron-électron, lesquels



ioniseront la matière à la manière d'un rayonnement β .

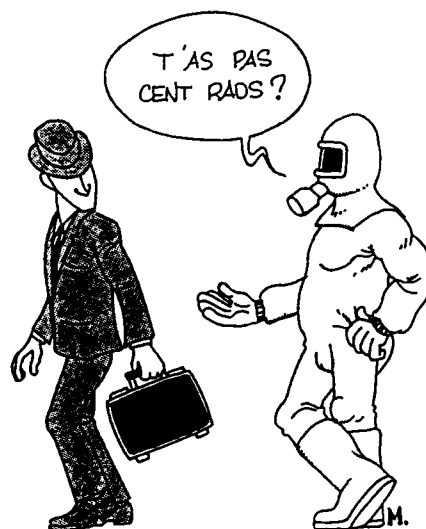
Pour une énergie donnée et un matériau donné l'interaction du photon avec la matière obéit à une loi probabiliste. Plus le matériau est dense et l'énergie faible et plus le photon a de chance d'être arrêté au cours d'un déplacement de longueur donnée. Globalement le phénomène se traduit par une atténuation exponentielle du faisceau de photons en fonction de la distance parcourue. Par exemple le rayonnement γ du Césium 137 est réduit au $1/10^{me}$ de sa valeur par 13,5 cm de béton ou 2,1 cm de plomb. Il sera donc réduit au $1/100^{me}$, le dixième du dixième, par des épaisseurs respectivement doubles, 27 cm de béton et 4,2 cm de plomb.



Par ailleurs l'intensité d'un rayonnement γ ou X émis par une source ponctuelle donnée varie en fonction inverse du carré de la distance à cette source, tout comme l'intensité du flux lumineux d'une lampe ou l'amplitude de la voix d'un chanteur d'opéra en

plein air. Cette propriété, bien connue sous le nom de conservation du flux, n'a d'importance qu'au voisinage de sources concentrées intenses. Dans le cas qui nous préoccupe, la pollution radioactive de l'environnement, seules l'atténuation liée à l'absorption des rayonnements par la matière ou la fuite peuvent limiter les doses d'irradiation subies.

On peut résumer l'action d'un rayonnement par l'énergie qu'il cède à la matière. En gros l'énergie est proportionnelle au nombre d'ionisations. Cette énergie est usuellement exprimée en Rad, 1 Rad = 1/100 joule/kg. Rappelons qu'une énergie d'un joule correspond au travail qu'il faut effectuer pour élever un kilo de 10,2 cm ou pour augmenter la température d'un gramme d'eau de $0,24^\circ C$. L'unité officielle depuis 1975 est le gray (Gy) ; un Gy égale 100 Rad. L'intensité de l'action d'un rayonnement sur la matière s'exprime en débit de dose ; par exemple, une irradiation de 5 rad en cinq heures correspond à un débit de dose d'un Rad/h.



Les rayonnements peuvent être détectés par divers instruments de mesure, le plus connu étant le compteur de Geiger. On conçoit que la mesure des rayons les plus pénétrants ne posent pas de difficultés particulières. Il n'en va pas de même des β mous et des α auxquels on ne peut accéder qu'après une préparation spéciale et coûteuse d'échantillons. A la suite d'un accident grave il n'est évidemment pas nécessaire d'attendre de connaître en détail la composition des retombées radioactives pour prendre des précautions. On sait quels genres de radio-éléments ont été libérés et de simples mesures des rayonnements globaux du sol et de l'air, effectuées à intervalle régulier au moyen d'instruments à large spectre, suffisent amplement pour suivre la situation à un endroit donné. Ces mesures, à condition d'être

diffusées au fur et à mesure de leur collecte, peuvent aider à apprécier la progression du nuage, par ailleurs prévisible par la météorologie, et à en prévenir les effets. Elles constituent l'information indispensable pour déterminer les interventions nécessaires localement et régionalement pendant et après le passage du nuage.

I.7. Pathologie des rayonnements.

I.7.1. Préambule.

Nous allons développer ce chapitre plus que les précédents pour plusieurs raisons :

- plus que toute autre activité industrielle l'énergie nucléaire a bénéficié de la bienveillance des institutions médicales ;
- les rayonnements tuent à des doses tellement minimales (en quantité d'énergie reçue par le corps) qu'on éprouve toujours beaucoup de difficultés à reconnaître le danger qu'ils présentent, surtout aux faibles débits de dose ; on n'y croit pas vraiment, comme ce cancérologue qui fume tel un sapeur, vis à vis du cancer du poumon ;
- contrairement aux intoxications chimiques aiguës ou graves, dont l'action se manifeste par des symptômes spectaculaires, les effets immédiats de la radioactivité (sauf à des doses plus que mortelles) sont imperceptibles, tout autant que sa présence échappe à nos cinq sens ;
- enfin, aux doses moyennes et faibles, elle n'induit de dommages qu'en probabilité et à longue échéance. De ce point de vue la catastrophe nucléaire étend la liste des risques liés aux activités insalubres (mines, chimie etc) à l'ensemble de la population. Elle va même plus loin en menaçant les conditions de la survie sur de vastes territoires. Avec en plus l'inconvénient d'agir à distance, la radioactivité peut condamner un lieu ou une ressource comme la dioxine à SEVESO ou le diéthylmercure à MINAMATA.

Et on se souvient que les habitants de SEVESO reprirent possession de leurs biens et maisons en zone interdite : puisqu'ils ne voyaient rien, ne sentaient rien et que la nature paraissait intacte, alors c'est qu'on leur mentait. Contre un détriment tangible, injuste et angoissant, la perte d'une vie de travail, d'un lieu chargé de souvenirs, l'esprit humain refuse l'explication d'un risque diffus, hypothétique, abstrait et, échaffaudant la théorie d'un complot, tombe dans la paranoïa.

Sont ainsi posés des problèmes politiques, sociaux et philosophiques absolument nouveaux qu'il faudra bien un jour cesser d'évacuer par des comparaisons insanes avec les victimes des accidents de la

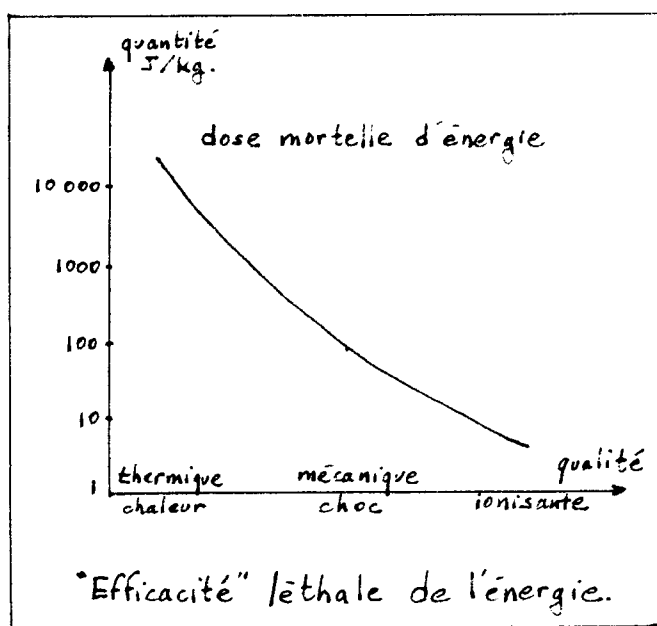
route, de l'alcool, du tabac et, pourquoi pas,... on y verra bien un jour, du SIDA.

Sur la première raison il faut brièvement rompre le silence et mettre le corps médical devant ses responsabilités historiques : quelques uns de ses membres ont marché avec le lobby nucléaire, l'accès à certaines techniques de pointe en matière de traçage isotopique et d'outils de diagnostic utilisant le savoir nucléaire en échange d'un appui sans réserve, sinon tacite, au développement des applications productives de l'énergie atomique.

I.7.2. Mort et énergie.

L'énergie peut tuer, chacun en est conscient. Mais la radioactivité possède un pouvoir mortifère qui défie l'imagination. Quelques exemples donneront une idée de l'abîme qualitatif qui la sépare des autres formes d'énergie. Commençons par les agressions énergétiques tuant à coup sûr par une action sur l'ensemble de l'organisme humain :

- une élévation de $6^{\circ} C$. de la température du corps, soit 24 000 J/kg de poids de corps ;
- une chute de 10 mètres sur une sol dur, soit 100 J/kg ce qui donnera une élévation de température du corps de $0,025^{\circ} C$. après l'impact ;
- une irradiation de 600 Rad, soit 6 J/kg, à peine plus d' $1/1000^{\circ} C$.



La chaleur, forme dégradée de toutes les énergies, tuera en bloquant le cycle d'oxygénation du cerveau. Le choc, matérialisation brutale de l'énergie cinétique accumulée pendant la chute, fera éclater les organes, rompra les os et provoquera de multiples

hémorragies. Et l'irradiation endommagera un si grand nombre de cellules (modifications chimiques) que, les fonctions réparatrices de l'organisme étant débordées, la mort surviendra en quelques jours ou quelques semaines après un effondrement des fonctions vitales et des défenses de l'organisme.

Mais l'énergie peut aussi tuer "à moindres frais", de façon sélective. De fait une balle de pistolet bien placée ou un coup de couteau adroit suppriment une vie en délivrant moins d'énergie qu'une irradiation globale. Mais la radioactivité aussi sait pratiquer des attaques sélectives : l'iode 131 inhalé ou ingéré se concentre très rapidement dans la thyroïde (une glande située à la base du cou) et la dose qui provoque à coup sûr un cancer thyroïdien correspond à une énergie de 0,2 joule, celle d'un poids de 1 kg tombant de 2 cm. Une telle dose ne pèse que quelques milliardièmes de gramme !

Nous sommes ainsi en mesure de saisir dans toute ses dimensions le danger de la radioactivité :

- une énergie de très haute qualité capable de porter le désordre au coeur des cellules ;
- un potentiel énergétique par unité de masse inaccessible à l'imagination.

1.7.3. Effets non-aléatoires des rayonnements

Nous venons d'évoquer une des catégories de la pathologie des rayonnements, celle qui traite des atteintes somatiques non aléatoires, c'est à dire certaines et garanties. On peut les caractériser comme les conséquences d'une exposition partielle ou globale de l'organisme à des débits de doses élevés durant un laps de temps relativement bref, de quelques fractions de seconde à quelques jours, ou bien à l'absorption et à la fixation par l'organisme de radioéléments qui induiront des effets pathogènes certains.

Avant de poursuivre nous devons prendre connaissance de l'unité utilisée pour chiffrer la nocivité d'un rayonnement, le Rem (*R ad e* quivalent *m an*) qui transforme une "unité d'action physique" en une "unité d'effet biologique". Une **dose** de rayonnement a un effet exprimé en **équivalent de dose, ED** selon la formule :

$$ED = \text{Dose} \times FQ \times FD$$

où FQ est un facteur de qualité qui rend compte de la densité d'ionisation sur le trajet du rayonnement dans les tissus vivants tandis que FD est un facteur de distribution, utilisé pour les calculs d'irradiation interne par les particules α et β afin de prendre en compte la

distribution non uniforme des radionucléides dans un tissu.

En pratique, pour des irradiations externes on prend une valeur 1 pour FQ, quel que soit le rayonnement β , γ ou X . Pour les irradiations internes, FQ varie de 1 (γ) à 10 (α), ce qui rend justice au pouvoir ionisant élevé des particules α .

Cela posé, détaillons maintenant les effets non aléatoires des rayonnements ionisants :

- en dessous de 100 rem, on n'observe rien sauf une légère modification temporaire de la formule sanguine ;
- de 100 à 250 rem, des troubles digestifs légers, épilation partielle, fatigue persistante (plusieurs mois), troubles sanguins sans gravité ;
- de 250 à 400 rem, nausées, vomissements, vertiges dès l'irradiation, risque élevé d'infections mortelles, nécessité de transfusions ou d'une greffe de moelle osseuse ;
- plus de 600 rem, symptômes comme ci-dessus mais aggravés, risque de perforation intestinale, 80% de morts dans les 15 jours ;
- au delà de 800 et 1000 rem, la mort est inévitable.

Sur le site de TCHERNOBYL le débit de dose a atteint plusieurs centaines de Rad/heure pendant les jours qui ont suivi l'accident. Par ailleurs, d'après les modèles mathématiques utilisés pour prédire les suites d'une catastrophe nucléaire, pour une personne restant 24 heures sans protection à 30 km sous le vent d'un réacteur de 1000 MWé dont tout le combustible a fondu, l'irradiation externe et interne reçue irait, selon la vitesse du dépôt et la météo, de 180 rem dans le cas "le plus favorable" à 13 000 rem dans le pire. à 100 km la fourchette serait de 8 à 4 500 rem.

Savoir se protéger peut donc bien être une question de vie ou de mort.

Les contaminations cutanées importantes se manifestent au bout de quelques heures à quelques jours par des brûlures analogues à des coups de soleil et par des pertes de cheveux et de poils. De tels symptômes appellent des mesures de décontamination énergiques puis un examen approfondi pour détecter une éventuelle contamination interne.

1.7.4. Effets aléatoires des rayonnements ionisants.

A côté de ces effets non aléatoires, à des doses plus faibles et à plus longue échéance, la radioactivité peut provoquer un accroissement de certaines maladies ainsi que des troubles génétiques.