

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON I
FACULTE DE PHARMACIE
INSTITUT DES SCIENCES PHARMACEUTIQUES ET BIOLOGIQUES

1997

THESE n°103

THESE

Pour le
DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE

présentée et soutenue publiquement le 15 décembre 1997

par

Monsieur BERTRAND Sylvain

né le 19 Octobre 1972

au Puy-en-Velay

**ÉTUDE COMPARÉE DES RISQUES POUR LA SANTÉ DE LA PRODUCTION D'ÉNERGIE
NUCLÉAIRE ET THERMIQUE (CHARBON, FUEL, GAZ).**

JURY

Pr. P. CHAMBON

Dr. Ch. TROUILLET

M. J.B. RICARD

A mes Parents,

ils m'ont encouragé tout au long de mes études,
et ont toujours été présents, surtout dans les moments difficiles.

A mes Amies et Amis,

pour tous les moments partagés durant ces années d'étude.

Remerciements au Professeur Paul CHAMBON,
pour avoir accepté la présidence de cette thèse,
et pour m’ avoir permis d'aborder un thème sujet à de nombreuses polémiques.

Remerciements au Docteur Christian TROUILLET,
pour s’être proposé comme membre du jury,
et pour ses conseils en matière de médecine de travail.

Remerciements à Monsieur Jean-Baptiste RICARD,
pour son enthousiasme à participer au jury,
et pour ses conseils en matière de sûreté nucléaire.

Remerciements spéciaux à Monsieur Pierre GILIBERT,
pour son aide précieuse dans l’élaboration de cette thèse.

Liste des Présidents, Vice-Présidents et Directeurs d'U.F.R. de l'Université

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1

Président de l'Université	M. le Professeur M. DEHAVANNE
Vice-Président Fédération Santé	M. le Professeur J. DOURY
Vice-Président Fédération Sciences	M. le Professeur Y. LEMOIGNE
Vice-Président du Conseil Scientifique	M. le Professeur J. REMILLIEUX
Vice-Présidents des Centres d'Evaluation et de Coordination Thématiques :	
- Sciences de la Matière et Technologies	M. J.F. JAL, Chercheur CNRS
- Sciences de la Vie et de la Santé	M. le Professeur L. COLLET
Vice-Président du Conseil des Etudes et de la Vie Universitaire	M. le Professeur J.C. DUPLAN
Secrétaire Général	M. J. FLACHER

FEDERATION SANTE

Composantes :

UFR de Médecine Lyon R.T.H. Laënnec	Directeur : M. le Professeur P. PERRIN
UFR de Médecine Lyon Grange-Blanche	Directeur : Mme le Professeur H. PELLET
UFR de Médecine Lyon Nord	Directeur : M. le Professeur L.M. PATRICOT
UFR de Médecine Lyon Sud	Directeur : M. le Professeur J.P. GERARD
UFR d'Odontologie	Directeur : M. le Professeur J. DOURY
Institut des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques	Directeur : M. le Professeur C. COLLOMBEL
Institut Techniques de Réadaptation	Directeur : M. le Professeur M. EYSSETTE
Département de Formation et Centre de Recherche en Biologie Humaine	Directeur : M. le Professeur P.A. BRYON
Département de Formation à la Recherche et à l'Evaluation Pédagogiques	Directeur : M. le Professeur M. LAVILLE

FEDERATION SCIENCES

Composantes :

UFR de Mathématiques Appliquées, Gestion et Economie	Directeur : M. le Professeur J.C. AUGROS
UFR de Physique	Directeur : M. le Professeur J.L. VIALLE
UFR de Biologie	Directeur : M. le Professeur D. DEBOUZIE
UFR de Mécanique	Directeur : M. le Professeur J.N. GENGE
UFR de Génie Electrique et des Procédés	Directeur : M. le Professeur G. GILLES
UFR Sciences de la Terre	Directeur : M. le Professeur S. ELMI
UFR de Mathématiques	Directeur : M. le Professeur J.M. MORVAN
UFR d'Informatique	Directeur : M. le Professeur D. VANDORPE
UFR de Chimie-Biochimie	Directeur : M. le Professeur J.P. SCHARFF
UFR STAPS	Directeur : M. le Professeur P. THIRIET
Observatoire de Lyon	Directeur : M. le Professeur R. BACON
Institut des Sciences et des Techniques de l'Ingénieur de Lyon.	Directeur : M. le Professeur P. TROMPETTE
Département de 1er cycle Sciences	Directeur : M. le Professeur P. PONCET
IUT A	Directeur : M. le Professeur J. GIELLY
IUT B	Directeur : M. le Professeur J. PIVOT

21.02.97

Sommaire

Liste des figures.....	8
Liste des tableaux.....	9
Introduction.....	10
I- Rappel historique.....	10
II- Les sources d'énergie actuelles.....	10
Production d'énergie thermique.....	12
I- Les combustibles.....	12
I.1- Extraction et traitement.....	12
<i>I.1.1- Charbon.....</i>	<i>12</i>
<i>I.1.2- Fuel.....</i>	<i>12</i>
<i>I.1.3- Gaz.....</i>	<i>12</i>
I.2- Cycle du combustible.....	13
II- Fonctionnement d'une centrale thermique.....	13
III- Rejets et déchets.....	15
III.1- Le charbon.....	15
III.2- Le fuel.....	15
III.3- Le gaz.....	16
Production d'énergie nucléaire.....	17
I- Le combustible.....	17
I.1- Extraction et traitement.....	17
I.2- Cycle du combustible.....	17
II- Fonctionnement d'une centrale nucléaire.....	18
II.1- Rappels sur les cycles des deux principaux isotopes de l'uranium.....	18
II.2- Les différentes filières du nucléaire	19
<i>II.2.1- Les centrales à Uranium Naturel - Graphite - Gaz (UNGG).....</i>	<i>19</i>
<i>II.2.2- Les centrales à uranium enrichi - eau ordinaire: Réacteurs à Eau Pressurisée (REP).....</i>	<i>19</i>

II.2.3- Les centrales surgénératrices: Réacteurs à Neutrons Rapides (RNR).....	23
III- Rejets et déchets.....	26
Risques pour la Santé : étude comparée.....	28
I- Énergie thermique (charbon, fuel, gaz).....	29
I.1- Risques pour le Public.....	29
I.1.1- Le dioxyde de soufre (SO ₂).....	29
I.1.2- Les oxydes d'azote (NO ₂ et NO).....	29
I.1.3- Les oxydes de carbone (CO ₂ et CO).....	30
I.2- Risques pour le personnel exploitant.....	32
I.2.1- La mine.....	32
I.2.2- Le puits d'extraction et le transport.....	33
I.2.3- La raffinerie, l'usine de traitement et la centrale thermique.....	33
I.3- Environnement.....	35
I.3.1- L'effet de serre.....	35
I.3.2- Les pluies acides.....	35
I.3.3- L'échauffement des eaux.....	36
I.3.4- Les accidents.....	36
II- Énergie nucléaire.....	38
II.1- Risques pour le Public.....	38
II.1.1- La perception par le Public de la production d'énergie nucléaire.....	38
II.1.2- Les effets des rayonnements ionisants.....	39
II.1.3- La radioprotection.....	41
II.2- Risques pour le personnel exploitant.....	44
II.2.1- La mine et le transport.....	44
II.2.2- L'usine d'enrichissement et la fabrication du combustible.....	44
II.2.3- La centrale nucléaire.....	44
II.2.4- L'usine de retraitement.....	46
II.3- Environnement.....	47
II.3.1- L'échauffement des eaux.....	47
II.3.2- La radioécologie.....	47
II.3.3- Les accidents.....	47
III- Comparaison.....	49
Conclusion.....	52

Annexes.....	53
Annexe 1: Définitions.....	53
Annexe 2: Rappel sur les rayonnements ionisants.....	54
Annexe 3: Unités de mesure utilisées dans le domaine nucléaire.....	56
Bibliographie.....	57

Liste des figures

Figure 1: Énergie thermique: Cycle du combustible	13
Figure 2: Schéma de fonctionnement d'une centrale thermique	14
Figure 3: Énergie nucléaire: Cycle du combustible	18
Figure 4: Crayon de combustible nucléaire	20
Figure 5: Assemblage et grappe de contrôle	21
Figure 6: Schéma de fonctionnement d'une centrale nucléaire à uranium enrichi - eau ordinaire	22
Figure 7: Système de confinement d'une centrale nucléaire à uranium enrichi - eau ordinaire	23
Figure 8: Schéma de fonctionnement d'une centrale nucléaire surgénératrice	24
Figure 9: Système de confinement d'une centrale nucléaire surgénératrice	25
Figure 10: Effets immédiats des accidents	38
Figure 11: Sources naturelles et humaines induisant une exposition aux radiations	41

Liste des tableaux

Tableau I:

Limites d'exposition dans les conditions normales du travail: exposition externe exclusive---41

Tableau II:

Échelle de gravité des accidents et incidents dans les réacteurs nucléaires-----46

Tableau III:

Comparaison de l'impact exercé par une centrale à charbon et une centrale nucléaire-----48

Tableau IV:

Unités utilisées en radioprotection-----54

Introduction

I- Rappel historique

Depuis son apparition sur la Terre, l'homme a toujours utilisé de l'énergie pour faciliter ses tâches quotidiennes.

FREMLIN (1985) nous rappelle succinctement les différentes sources d'énergie qu'il a employées. La première a été son énergie musculaire, puis la seconde le feu. Par la suite l'homme a domestiqué des animaux (boeuf, cheval) et les a utilisés pour différents travaux, notamment agricole. Certaines périodes de l'humanité sont aussi marquées par l'esclavage, où des hommes (esclaves) produisaient de l'énergie pour d'autres hommes.

Avec l'apparition des premières technologies, dans l'Antiquité, l'homme apprit à exploiter son environnement: l'eau, le vent, la vapeur, puis le charbon, le fuel, le gaz. Aujourd'hui, l'homme utilise de nombreuses sources d'énergie en plus de celles citées précédemment: l'énergie nucléaire, l'énergie solaire, l'énergie géothermique, etc.

II- Les sources d'énergie actuelles

FREMLIN (1985) fait un inventaire des sources d'énergie utilisées actuellement. Elles sont nombreuses et variées, chacune avec ses avantages et ses inconvénients:

L'hydroélectricité est basée sur l'utilisation gravitationnelle de l'énergie potentielle de l'eau. Cette ressource est exploitée depuis longtemps. Les premiers moulins à eau remontent à 2000 ans environ. Depuis les cent dernières années on utilise l'eau pour produire de l'énergie électrique. L'installation d'un barrage sur une rivière entraîne la formation d'un lac faisant office de réservoir. Le débit de l'eau est contrôlé. L'eau passe par des turbines générant le courant électrique.

Ce système présente de nombreux avantages : production du courant réglable en fonction de la demande (on modifie le débit), coût bien moins cher que pour l'énergie solaire, les turbines se remplaçant facilement. Son inconvénient majeur est qu'il dénature l'environnement (on noie toute une vallée), dont notamment l'accumulation de boue en amont du barrage à l'origine de désagréments d'ordre écologique.

Comme l'eau, *le vent* est aussi utilisé depuis longtemps comme source d'énergie. L'énergie éolienne est aujourd'hui employée dans certains endroits isolés pour produire de l'énergie électrique. Cependant la production en grande quantité est difficile du fait de son mauvais rendement. Ce système demande un vent important, et doit pouvoir produire de l'énergie quand le vent est faible. En fait cette source d'énergie est à l'étude actuellement et n'est pas exploitée industriellement.

La marée est un phénomène résultant de l'interaction gravitationnelle entre la Terre et la Lune, provoquant le déplacement des masses d'eau océanes. Cette ressource est exploitée depuis peu de temps. Un barrage est construit dans une baie ou un estuaire. On place des turbines selon le même schéma qu'une centrale hydroélectrique. Les mouvements de la marée font tourner les turbines qui produiront de l'énergie électrique (l'usine de la Rance est conçue sur ce principe). Ce système présente un coût réduit à l'exploitation, mais, à long terme, il entraîne un changement de l'écologie maritime de la baie ou de l'estuaire, il a donc un impact sur l'environnement.

La photoélectricité fait intervenir une cellule photovoltaïque: l'énergie solaire captée par la cellule se transforme en énergie électrique. Ce système est très utilisé dans les pays chauds pour produire de l'énergie, mais se voit peu sous nos latitudes. Il est aussi très employé dans l'aérospatiale: les satellites et les sondes spatiales en sont équipés pour s'auto-alimenter. S'il a l'avantage d'être non polluant (pas de rejet) et non dégradant pour la nature, son coût est élevé. De plus son utilisation oblige l'emploi de condensateurs pour avoir du courant la nuit ou en cas de non-enseillement (nuages, pluies...), et ce type de production d'énergie est peu réglable.

Les centrales géothermiques utilisent la chaleur de la planète comme source d'énergie. Cette source de chaleur se situe entre 10 et 20 kilomètres de la surface terrestre. Les centrales sont construites sur une source d'eau chaude (température supérieure à 100°C). L'eau sous pression fera tourner des turbines qui produiront l'énergie. L'avantage de ce système est qu'il est exploitable sur toute la planète, mais il reste très coûteux.

La biomasse (masse de matière vivante, animale ou végétale, de la surface du globe terrestre) est une source d'énergie à part entière. L'extraction du pétrole pour obtenir du fuel ou du gaz, brûler du bois pour obtenir du charbon reposent sur la biomasse. Ces ressources servent à produire de l'énergie et ont pour origine l'action de la biomasse dans le temps.

Enfin, *la maîtrise des réactions nucléaires* a permis d'utiliser cette source d'énergie d'origine nucléaire pour produire du courant électrique.

Ces deux dernières sources d'énergie sont les plus exploitées actuellement pour produire de l'énergie électrique. Il est donc intéressant de faire une mise au point à leur sujet.

Après un aperçu des méthodes de production d'énergie thermique et nucléaire, cet ouvrage présentera d'une part les risques pour la Santé de ces méthodes, aussi bien pour le Public, que pour le personnel exploitant ces ressources, et d'autre part leur impact sur l'environnement. Il essaiera de les comparer afin d'évaluer celle qui présente le moins de danger.

Production d'énergie thermique

I- Les combustibles

I.1- Extraction et traitement

I.1.1- Charbon

D'origine végétale, le charbon est un combustible noir, solide. Selon BELHOSTE, DURAND, et MACCIA (1979), il existe plusieurs technologies d'extraction minière:

- extraction souterraine dans des mines profondes ou peu profondes,
- extraction à ciel ouvert.

Le charbon est ensuite préparé (concassage, broyage) , et transporté par voie ferroviaire, maritime, fluviale, ou par caroduc, jusqu'à la centrale thermique.

I.1.2- Fuel

Le fuel est un combustible liquide, d'origine minérale, obtenu à partir du pétrole (huile minérale naturelle accumulée dans des gisements. BELHOSTE, DURAND, et MACCIA (1979) expliquent que le pétrole est extrait à partir de puits d'extraction (on parle aussi de plates-formes de forage ou plates-formes pétrolières). Ces puits peuvent se situer sur terre comme en mer.

Le pétrole est ensuite acheminé vers une raffinerie où il sera traité. Les moyens de transport utilisés sont nombreux: pipeline, transport maritime, ferroviaire ou routier. Le pétrole raffiné donne notamment le fuel qui sera transporté par les mêmes moyens vers la centrale thermique.

I.1.3- Gaz

C'est un combustible gazeux d'origine animale et végétale. Il en existe plusieurs types:

- le gaz naturel, constitué principalement de méthane, présent dans des poches souterraines,
- le gaz de pétrole liquéfié, gaz résiduel des raffineries, contenant notamment du butane et du propane.

Son extraction nécessite l'implantation de puits pour les poches, ou peut être conjointe à l'extraction du pétrole.

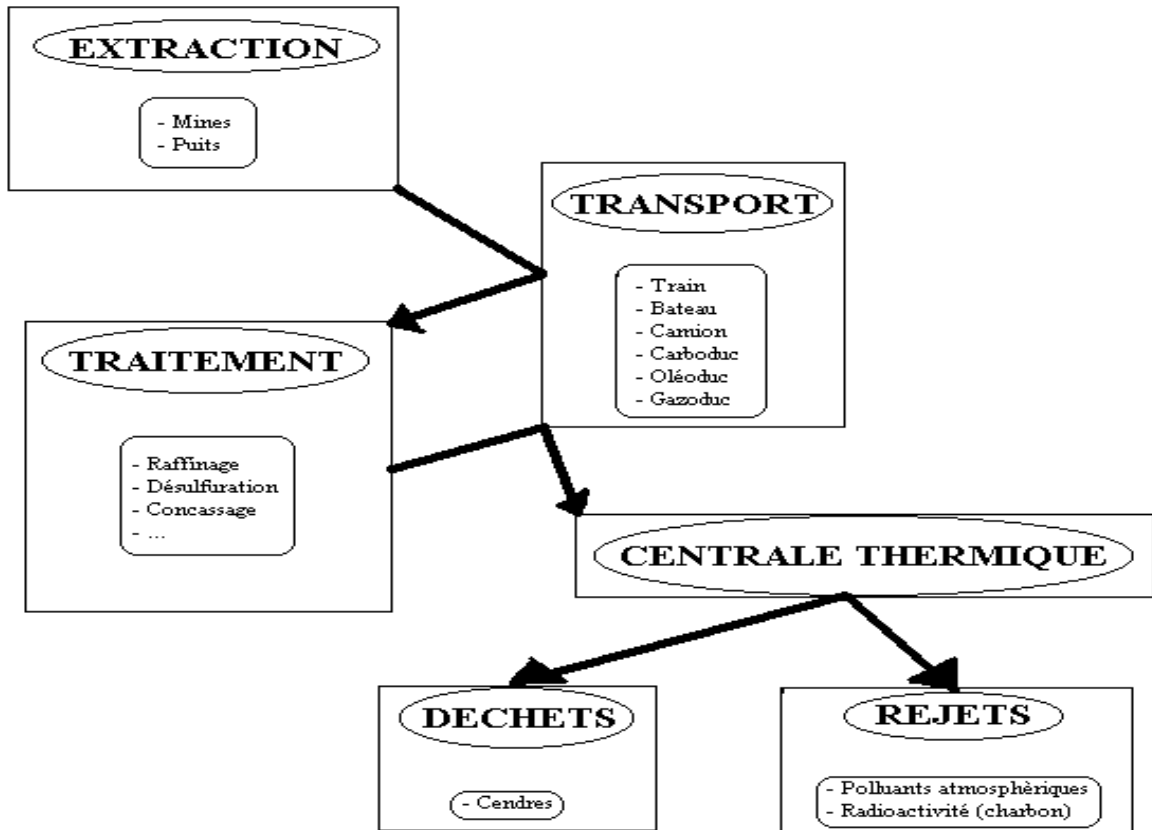
Le gaz obtenu doit être purifié. Son transport s'effectue par gazoduc, train, bateau ou camion. Après purification, le combustible est ensuite acheminé vers la centrale thermique.

N.B.: Pour le fuel comme pour le gaz, on a tendance en fait à raffiner et purifier le combustible sur le lieu d'implantation de la centrale, ce qui limite les risques dus au transport.

I.2- Cycle du combustible

La figure 1, ci-dessous, résume le cycle du combustible, depuis son extraction, jusqu'aux rejets qu'il engendre.

FIGURE 1: ÉNERGIE THERMIQUE: CYCLE DU COMBUSTIBLE

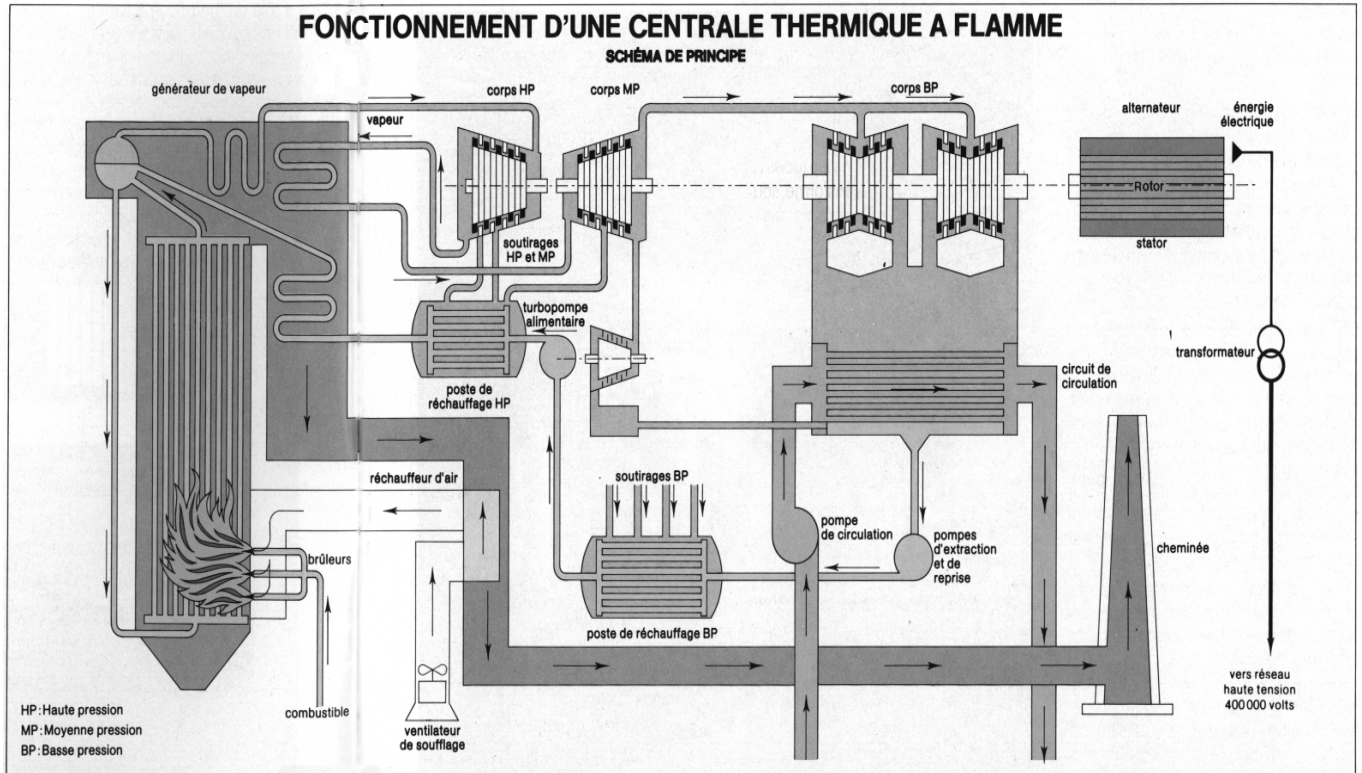


II- Fonctionnement d'une centrale thermique

Une usine thermique produit de l'énergie électrique à partir de l'énergie calorifique obtenue en brûlant du charbon ou d'autres combustibles. La figure 2, page suivante, montre schématiquement le principe de fonctionnement d'une centrale thermique.

FIGURE 2: SCHÉMA DE FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE THERMIQUE

(D'APRÈS UN DOCUMENT EDF, 1985)



D'après une documentation E.D.F.(1985), on peut schématiser le fonctionnement d'une centrale thermique de la façon suivante:

- Si le combustible est du charbon, il est transformé dans les broyeurs en poussières impalpables. Mélangé à de l'air réchauffé, il est injecté ensuite par les brûleurs dans la chambre de combustion du générateur de vapeur.
- Si le combustible est du fuel ou du gaz, il est réchauffé pour accroître sa fluidité (fuel) et injecté dans des brûleurs de type adapté.

La chaleur dégagée par la combustion vaporise l'eau qui circule dans les tubes tapissant les parois de la chambre de combustion. La chaleur contenue dans les gaz de combustion est ensuite utilisée successivement pour surchauffer la vapeur au sortir du générateur de vapeur et resurchauffer la vapeur déjà utilisée dans la turbine, pour réchauffer l'eau revenant du condenseur à la chaudière, et pour réchauffer l'air extérieur destiné à la combustion. Ainsi le maximum de calories sont-elles récupérées, ce qui accroît sensiblement le rendement des installations (qui atteint un optimum de 40% aujourd'hui).

Dans les centrales qui brûlent le charbon, les gaz de combustion passent par des dépoussiéreurs électrostatiques qui retiennent la quasi-totalité des cendres volantes. Ces cendres sont stockées puis utilisées dans certaines industries.

L'eau chimiquement pure qui circule sous très haute pression dans les tubes du générateur de vapeur se transforme, sous l'effet de la chaleur, en vapeur qui atteint une très haute température. Cette vapeur se détend progressivement dans les trois corps, haute, moyenne et basse pression de la turbine.

III- Rejets et déchets

III.1- Le charbon

Au moment de son extraction des rejets sont possibles dans l'eau et dans l'air. BELHOSTE, DURAND et MACCIA (1979) précisent que la plupart des pays édictent des normes de rejet ou de concentration maximale. Ces normes portent sur l'acidité, le fer, les traces de métaux et les particules en suspension. En général les installations sont dotées de station d'épuration pour limiter les rejets et fonctionnent en circuit fermé.

Aucun rejet ne survient pendant le transport du charbon.

Par contre la combustion du charbon dégage de nombreux polluants. Pour FREMLIN (1985), CHASSARD-BOUCHAUD (1995) et BELHOSTE, DURAND et MACCIA (1979), le principal polluant est le dioxyde de soufre (SO_2). Ces derniers précisent même qu'il est nécessaire de désulfurer le combustible avant emploi pour limiter le rejet de dioxyde de soufre dans l'atmosphère. La teneur en soufre (à l'origine du dioxyde de soufre) dans le charbon doit être en moyenne de 1%.

Le charbon produit aussi du monoxyde de carbone (CO) et du dioxyde de carbone (CO_2) (CHASSARD-BOUCHAUD, 1995 et BELHOSTE, DURAND et MACCIA, 1979), ainsi que du monoxyde d'azote (NO), du dioxyde d'azote (NO_2) et du sulfure d'hydrogène (H_2S) à l'origine d'odeurs nauséabondes.

Enfin le charbon dégage aussi de nombreuses poussières. BELHOSTE, DURAND et MACCIA (1979) précisent d'ailleurs que les centrales thermiques fonctionnant au charbon doivent être équipées de dépoussiéreurs pour respecter la norme de rejet maximum fixée à 0,915 grammes de poussières par kilogramme de charbon brûlé.

Les autres polluants sont le benzo-a-pyrène, des aldéhydes, quelques traces de métaux (arsenic, cadmium, fer, mercure, plomb) (DURAND et BELHOSTE, 1979) et des déchets radioactifs (FREMLIN, 1985). Le charbon contient en effet des traces d'uranium 235 (0,00015 grammes pour 100 grammes de charbon, ayant une activité de 2 curies), et de ses descendants (notamment le radium 226).

III.2- Le fuel

Lors de l'extraction et du transport du pétrole, il y a risque de déversement d'effluents liquides dans l'environnement (BELHOSTE, DURAND et MACCIA, 1979), pouvant avoir des répercussions écologiques et économiques importantes. Le risque accidentel existe aussi (un incendie ou une explosion peuvent entraîner une pollution). Les auteurs jugent par contre négligeable le risque de dégagement d'effluent gazeux (hydrocarbures).

Le raffinage du pétrole entraîne aussi des rejets liquides (phénols, ammoniac, matières en suspension comme les traces de métaux) et gazeux (hydrocarbures essentiellement).

Lors de sa combustion, le fuel, comme le charbon, dégage principalement du dioxyde de soufre, des oxydes d'azote, des oxydes de carbone, des particules avec traces de métaux, des aldéhydes et des hydrocarbures aromatiques polycycliques.

Pour FREMLIN (1985), ces rejets sont quantitativement inférieurs à ceux engendrés par le charbon, excepté le dioxyde de carbone où le risque à long terme reste le même (conséquences sur le climat, sur la santé, effet de serre...).

III.3- Le gaz

S'il provient du raffinage du pétrole, les rejets sont les mêmes. S'il provient de poches souterraines, il peut y avoir uniquement un dégagement d'effluents gazeux. Le risque accidentel existe ici aussi.

Le transport du gaz n'entraîne aucun rejet.

Lors de sa combustion, le gaz s'avère qualitativement et quantitativement encore moins polluant que le fuel et le charbon (FREMLIN, 1985). La combustion dégage essentiellement des oxydes de carbone (CO et CO₂). CHASSARD-BOUCHAUD (1995) précise même que c'est le seul des trois combustibles qui ne dégage ni dioxyde de soufre, ni poussières.

Production d'énergie nucléaire

I- Le combustible

I.1- Extraction et traitement

La production d'énergie nucléaire est récente comparée à l'énergie thermique. Elle date de la fin des années 50. Ce type de production utilise l'uranium comme combustible. BELHOSTE, DURAND et MACCIA (1979) nous rappellent brièvement ses propriétés: quatre-vingt deuxième élément de la classification de MENDELEIEV, il est composé de trois isotopes naturels:

- 0,0059% d'uranium 234
- 0,71% d'uranium 235
- 99,28 % d'uranium 238.

La prospection de l'uranium se fait en utilisant les propriétés radioactives (émission alpha surtout) des descendants de l'uranium. Comme pour le charbon, les gisements sont exploités dans des mines souterraines ou à ciel ouvert.

C'est principalement l'uranium 235 qui est utilisé lors de la réaction nucléaire. Les minerais extraits doivent donc être traités car leur teneur en cet isotope est faible. On pratique un enrichissement en deux temps: concentration et purification. Enrichir l'uranium, c'est soumettre l'uranium naturel à des opérations permettant de le séparer en deux mélanges: l'uranium enrichi avec une plus grande proportion d'uranium 235 (3,25%) et l'uranium appauvri qui en contient moins (0,2 à 0,3%).

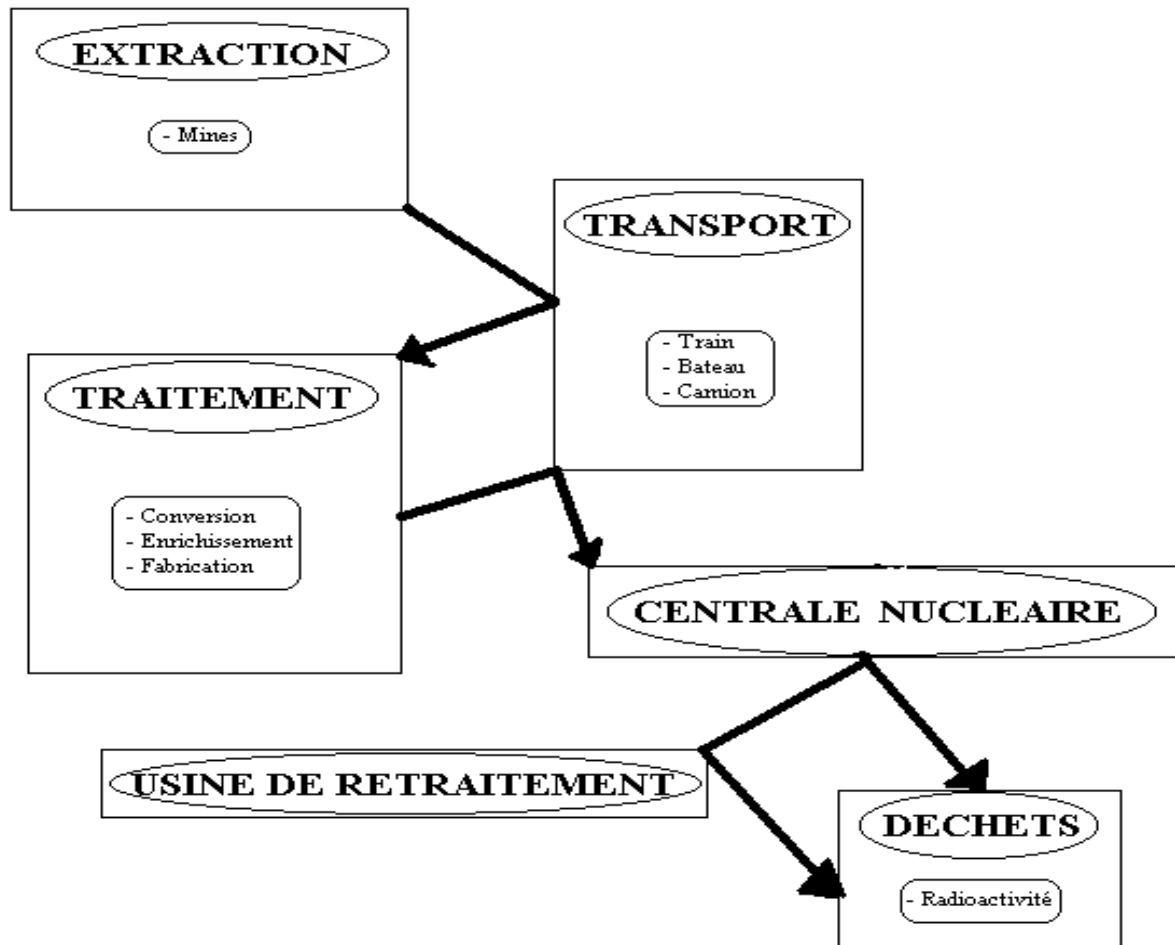
Le combustible est ensuite traité plus ou moins différemment selon la filière de la production d'énergie considérée.

Son transport s'effectue jusqu'à la centrale par voie terrestre (train, camion), fluviale ou maritime.

I.2- Cycle du combustible

La figure 3, page suivante, résume le parcours suivi par le combustible, de son extraction jusqu'au stockage des déchets.

FIGURE 3: ÉNERGIE NUCLÉAIRE: CYCLE DU COMBUSTIBLE



II- Fonctionnement d'une centrale nucléaire

II.1- Rappels sur les cycles des deux principaux isotopes de l'uranium

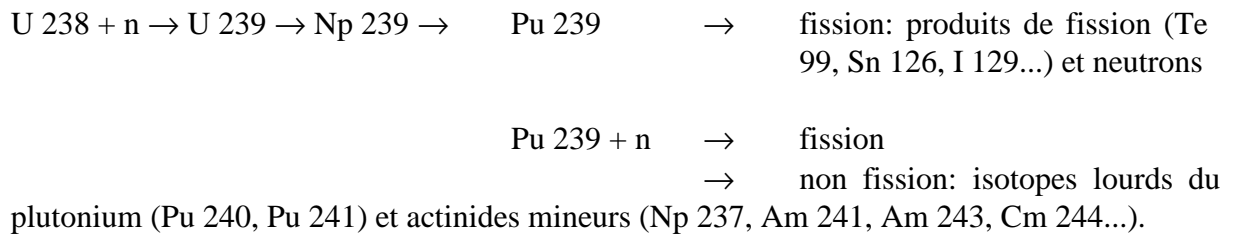
(Voir aussi l'annexe 2)

On utilise les deux isotopes uranium 235 (U 235) et uranium 238 (U 238) et des neutrons (n), produits directement par la fission naturelle de l'uranium 235.

U 235 → fission: produits de fission (Te 99, Sn 126, I 129...) et neutrons

U 235 + n → fission

→ non fission: U 236, Np 237 + uranium appauvri



Les différentes variétés d'uranium et de plutonium n'ont pas les mêmes propriétés vis-à-vis de l'action des neutrons. Les isotopes de nombre de masse pair (Uranium 238, Plutonium 240) sont beaucoup plus stables que les isotopes de nombre de masse impair (Uranium 235, Plutonium 239), et ne peuvent être fissionnés que par des neutrons d'énergie suffisante, animés d'une très grande vitesse. Par contre, les isotopes de nombre de masse impair sont suffisamment instables pour se fissionner sans l'aide d'un neutron. Ils seront donc à l'origine de la source de neutrons bombardant les noyaux de nombre de masse pair, et donc de la réaction nucléaire.

Par la suite la réaction nucléaire s'auto-entretient. La fission par un neutron d'un noyau d'uranium ou de plutonium s'accompagne en effet de la production de plusieurs neutrons qui pourront réagir à leur tour sur un autre atome. Il s'agit donc d'une réaction en chaîne.

II.2- Les différentes filières du nucléaire

(CARLE, 1993)

II.2.1- Les centrales à Uranium Naturel - Graphite - Gaz (UNGG)

Les réacteurs à uranium enrichi utilisent de l'uranium sous forme métallique gainé d'un alliage de magnésium.

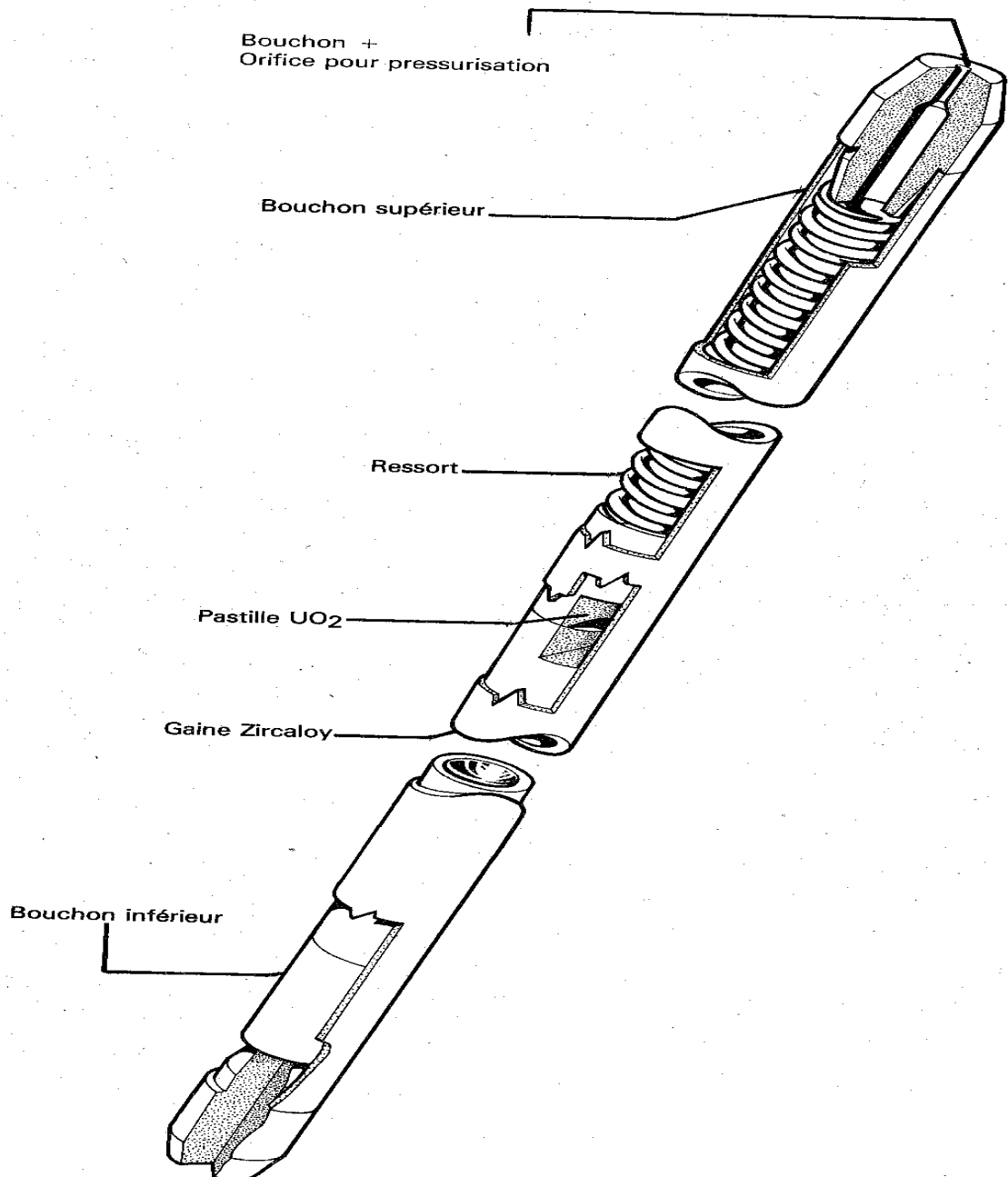
Les éléments combustibles sont disposés dans des canaux verticaux ménagés dans un empilement de brique de graphite. Pour en extraire la chaleur créée par la fission de l'uranium, on souffle sur ces éléments un courant de gaz carbonique sous pression. L'ensemble est placé à l'intérieur d'un caisson en acier ou en béton précontraint. Le gaz carbonique chaud cède la chaleur transportée dans un échangeur à l'eau d'un circuit secondaire qu'il vaporise. La vapeur après avoir entraîné un turboalternateur est condensée et retourne à l'échangeur.

II.2.2- Les centrales à uranium enrichi - eau ordinaire: Réacteurs à Eau Pressurisée (REP)

La majorité des réacteurs en service dans le monde (environ les deux tiers) appartient à la filière des réacteurs à eau sous pression.

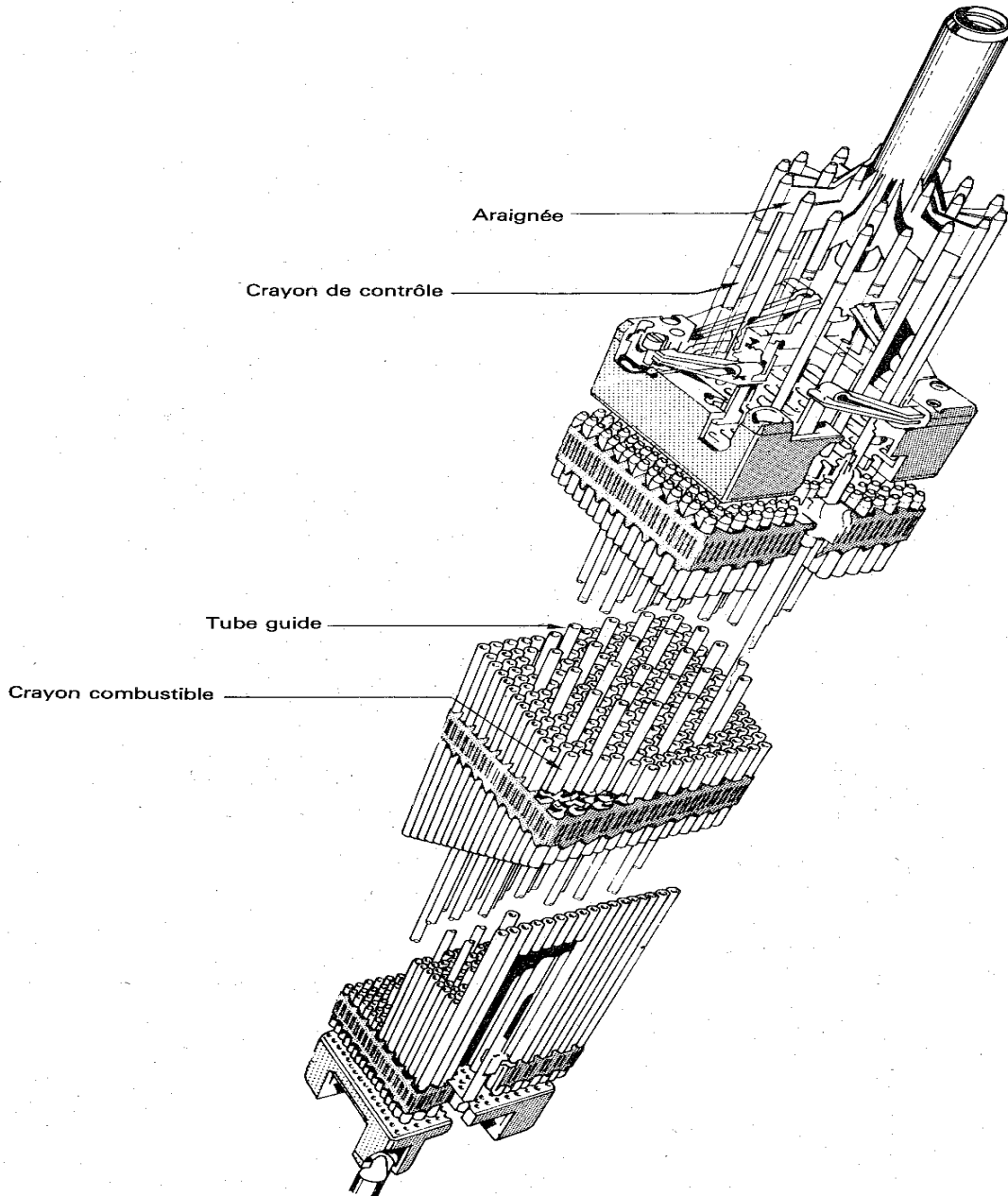
Le combustible de ces réacteurs est constitué de pastilles d'oxyde d'uranium enrichi à 3% environ en uranium 235. Ces pastilles sont enfilées dans des tubes en un alliage très résistant: le zircaloy (voir figure 4, page suivante).

FIGURE 4: CRAYON DE COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE (D'APRÈS UN DOCUMENT EDF, DATE INCONNUE)



Ces crayons sont ensuite regroupés en "assemblage" de 264 crayons (voir figure 5).

FIGURE 5: ASSEMBLAGE ET GRAPPE DE CONTRÔLE (D'APRÈS UN DOCUMENT EDF, DATE INCONNUE)



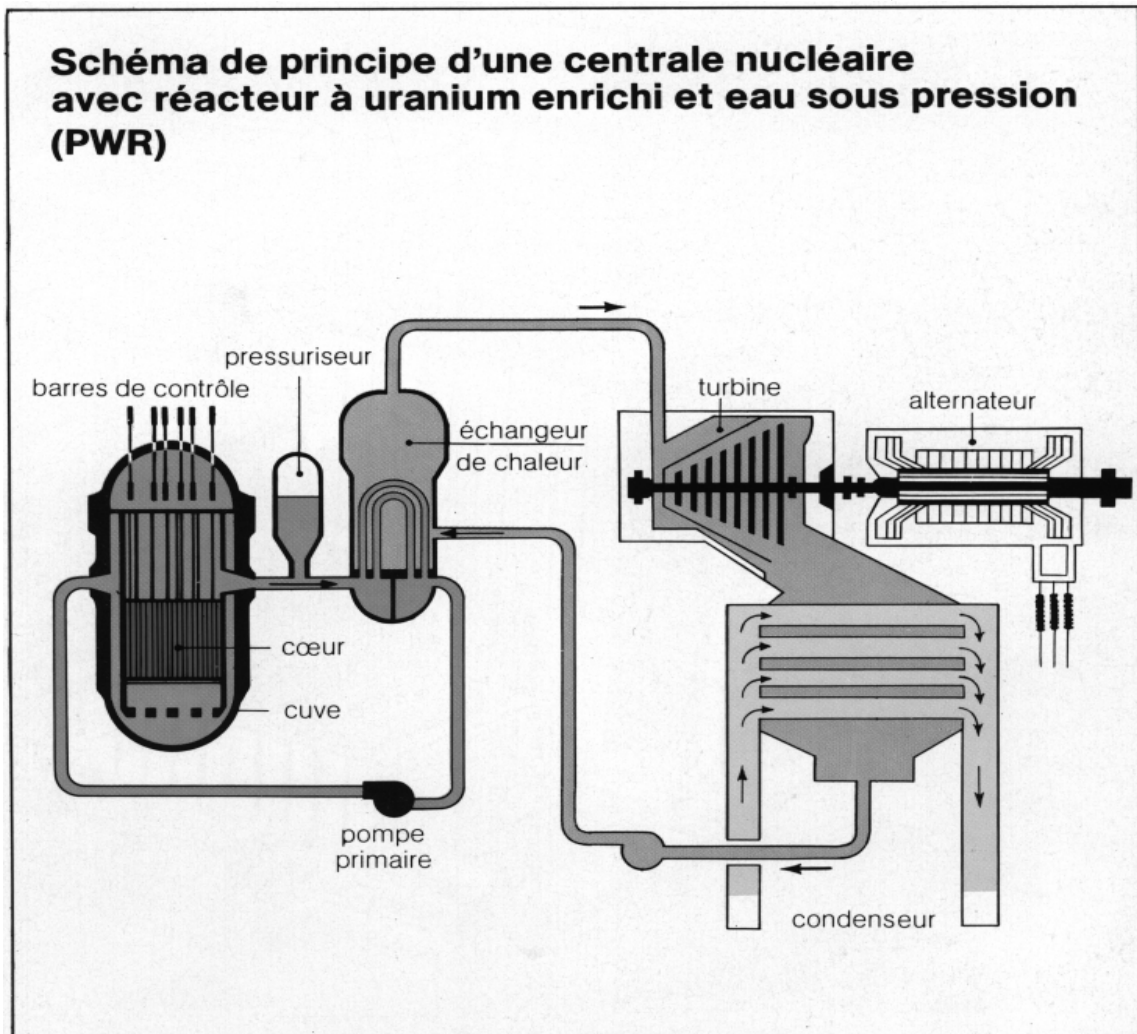
Un réacteur de 900 MW comprend 157 assemblages et un réacteur de 1300 MW, 193. Pour le contrôle de la réaction, des "grappes" absorbant les neutrons sont constituées par des crayons en alliage d'argent - indium - cadmium. Manoeuvrées de l'extérieur, elles couissent au milieu des assemblages, descendant plus ou moins selon la puissance réclamée, et en cas d'incident sur le réacteur (ce système représente donc une sécurité supplémentaire).

Les assemblages sont placés à l'intérieur d'une cuve en acier de plus de 20 cm d'épaisseur, d'environ 4 m de diamètre et de 13 m de haut pour un réacteur de 900 MW. La cuve est fer-

mée par un couvercle boulonné. Elle est remplie d'eau sous très forte pression (environ 155 bars), ce qui l'empêche de bouillir dans les conditions de fonctionnement (température d'entrée 280°C et température de sortie 323°C). Autour de la cuve sont disposées des boucles de refroidissement comportant chacune une pompe primaire et un générateur de vapeur. Ce circuit "primaire" d'eau sous pression extrait la chaleur produite dans le combustible. Un appareil appelé pressuriseur, constitué par des résistances placées dans le réservoir, permet de fixer la pression du circuit. Il est muni d'une soupape de décharge. C'est le seul endroit du circuit primaire où l'eau soit sous forme de vapeur.

La figure 6, ci-dessous, nous montre comment fonctionne une centrale nucléaire à eau sous pression.

FIGURE 6: SCHÉMA DE FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE NUCLÉAIRE À URANIUM ENRICHIS - EAU ORDINAIRE (D'APRÈS UN DOCUMENT EDF, 1983)

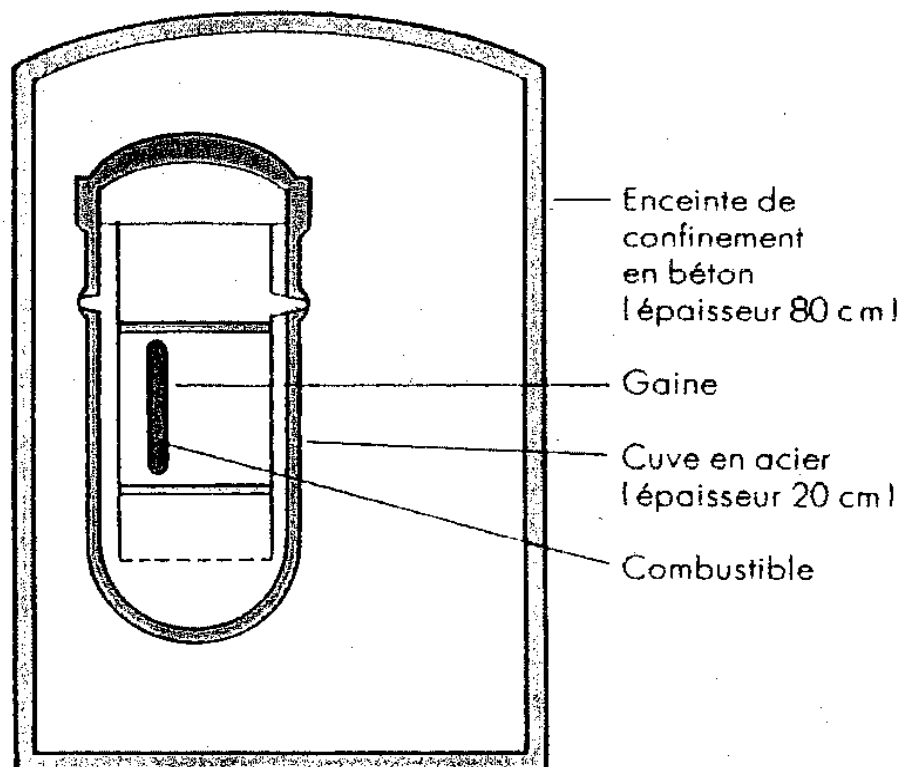


Les générateurs de vapeur sont des ensembles de multiples tubes en U parcourus intérieurement par l'eau du circuit primaire qui vient du réacteur. Ces tubes baignent dans l'eau du circuit secondaire, qui est à une pression beaucoup plus basse que le circuit primaire. Dans ces conditions elle bout au contact du faisceau de tubes en U et la vapeur produite, après séchage, est envoyée à la turbine du groupe turbo-alternateur.

Tous les ans on arrête le réacteur, on ouvre la cuve et on remplace une partie du combustible. Pour optimiser l'utilisation de l'uranium, les assemblages restant, dont une partie de la matière fissile est déjà consommée, sont redispesés dans la partie centrale du coeur du réacteur, les assemblages neufs étant placés à la périphérie.

L'ensemble du circuit primaire est enfermé dans une enceinte en béton précontraint conçue aussi bien pour résister aux agressions externes (tremblements de terre, chutes d'avion...) qu'à un accident interne (rupture d'une tuyauterie primaire par exemple). La figure 7, ci-dessous, explique le système de confinement d'une centrale nucléaire de type Réacteur à Eau sous Pression.

FIGURE 7: SYSTÈME DE CONFINEMENT D'UNE CENTRALE NUCLÉAIRE À URANIUM ENRICHÉ - EAU ORDINAIRE (D'APRÈS UN DOCUMENT EDF, DATE INCONNUE)



II.2.3- Les centrales surgénératrices: Réacteurs à Neutrons Rapides (RNR)

Dans les réacteurs à neutrons lents décrits jusqu'ici, une petite fraction seulement de l'uranium est utilisée, c'est à dire la plus grande partie de l'uranium 235 et un peu d'uranium 238. Au total, si l'on rapporte la masse consommée à la masse d'uranium naturel extrait des mines pour fabriquer le combustible, cela représente un peu moins de 1%. Or, potentiellement, tout est utilisable, même l'uranium 238, mais à condition de l'avoir transformé en plutonium 239. Cette transformation est particulièrement aisée dans les centrales surgénératrices.

Pour obtenir ce résultat, il faut éviter de ralentir les neutrons. Cela aura une conséquence immédiate vis-à-vis du fluide employé pour l'extraction de la chaleur du coeur des réacteurs à neutrons rapides: l'eau, l'eau lourde, les fluides organiques sont éliminés car ils sont trop riches en atomes d'hydrogène, absorbeurs de neutrons. Tous les réacteurs actuels font appel à un métal liquide, le sodium, retenu pour ses qualités thermiques. Le sodium passant dans le coeur du réacteur absorbe peu les neutrons, mais il acquiert une radioactivité qui interdit de courir tout risque de contamination sodium - eau. Les produits formés pourraient aussi endommager le combustible. C'est pourquoi dans tous les réacteurs un premier circuit de sodium extrait la chaleur des éléments combustibles et la transfère à un second circuit, lui aussi de sodium. Ainsi, s'il y a fuite de ce second circuit dans le premier (la fuite serait dans ce sens du fait de l'étalement des pressions), il n'y a aucune réaction chimique entre les deux fluides.

Le sodium intermédiaire réchauffé dans les échangeurs intégrés placés dans le coeur est mis en mouvement par quatre pompes secondaires, reliées chacune à une boucle, installées dans l'enceinte. Des tuyauteries le conduisent dans quatre bâtiments adjacents à l'enceinte, où se trouvent les générateurs de vapeur. C'est le seul endroit de l'installation où se trouvent, séparés par une seule paroi, du sodium et de l'eau. Par la suite on retrouve le schéma de fonctionnement d'un réacteur à eau pressurisée.

La figure 8, ci-dessous, nous montre le principe de fonctionnement d'une centrale surgénératrice.

Le système de confinement est ici différent. Une barrière supplémentaire est ajoutée, afin de réduire au maximum les risques d'accidents. Sur la figure 9, page suivante, cette protection supplémentaire correspond à la quatrième barrière (enceinte secondaire).

**FIGURE 8: SCHÉMA DE FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE NUCLÉAIRE SURGÉNÉRATRICE
(D'APRÈS UN DOCUMENT EDF, 1980)**

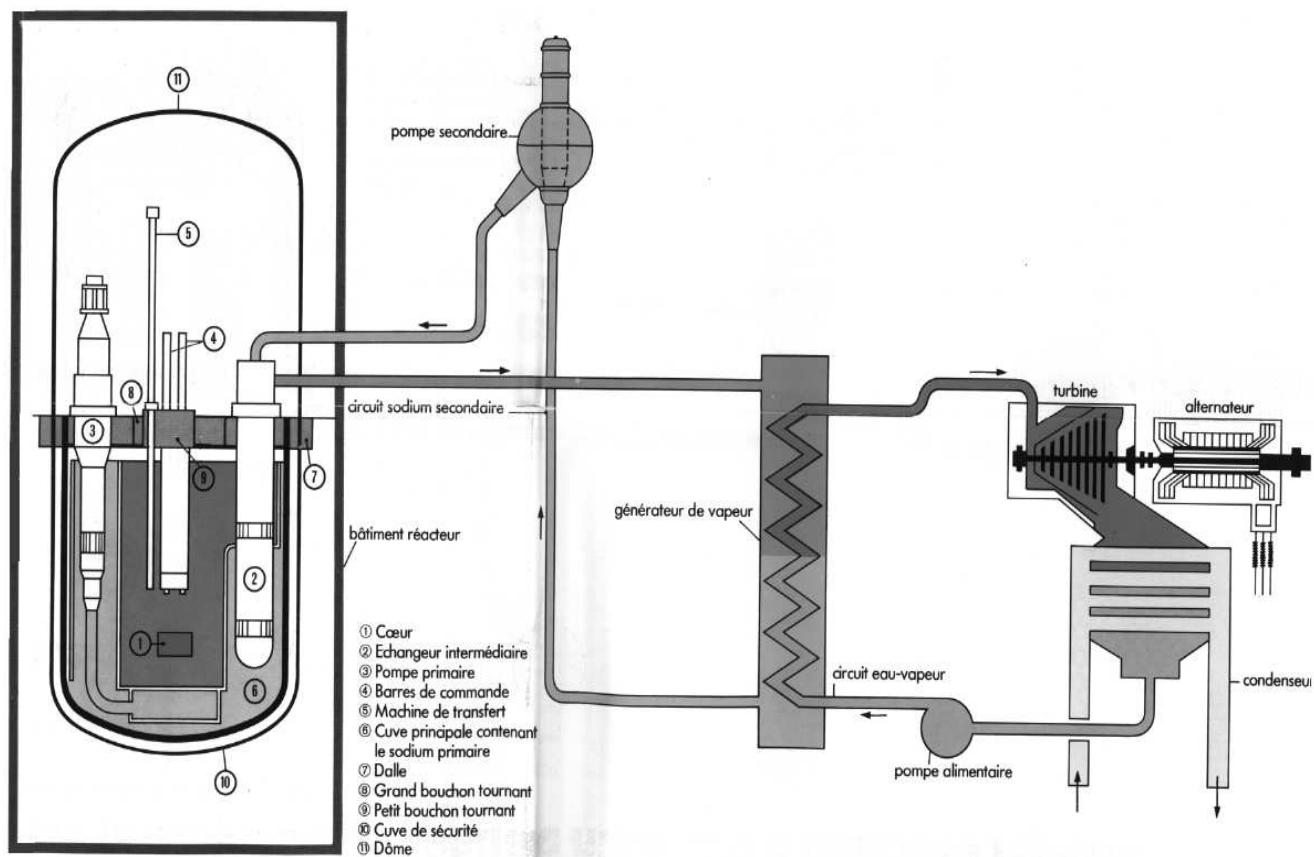
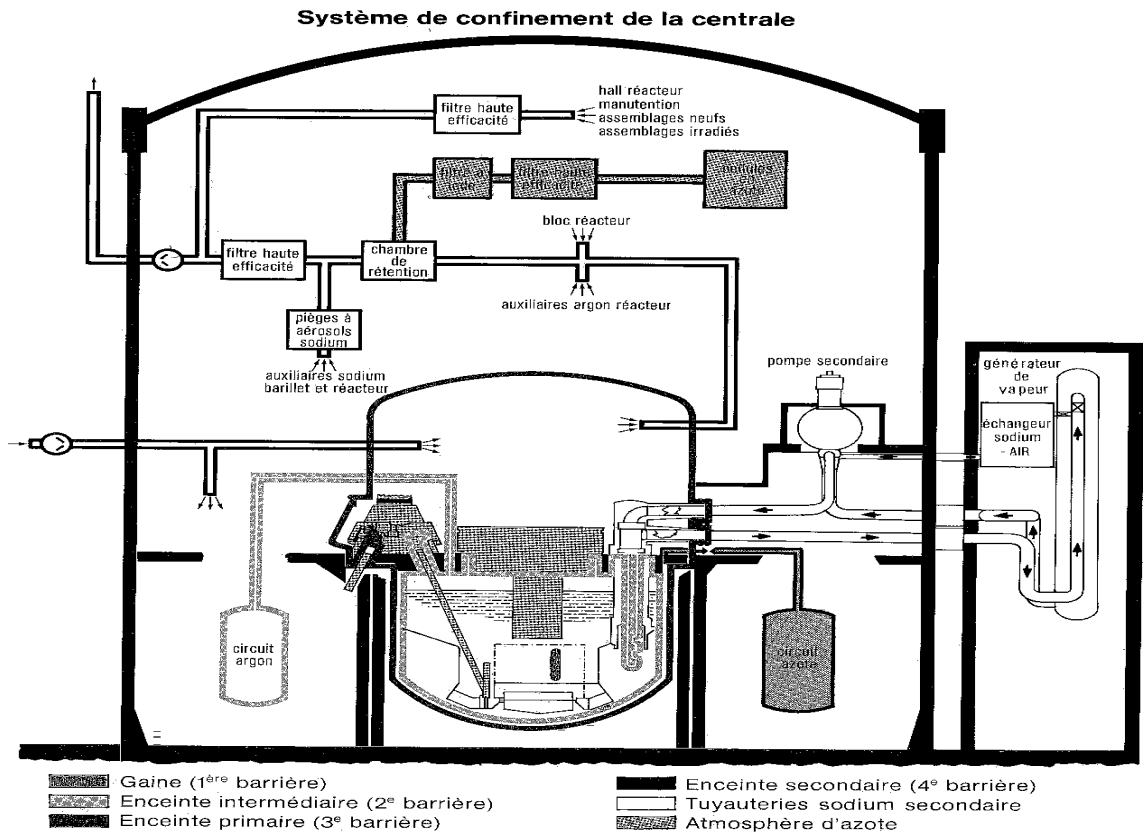


FIGURE 9: SYSTÈME DE CONFINEMENT D'UNE CENTRALE NUCLÉAIRE SURGÉNÉRATRICE (D'APRÈS UN DOCUMENT EDF, 1979)



III- Rejets et déchets

Les opérations d'extraction et d'enrichissement entraînent peu de rejets. Mais par la suite de nombreux déchets radioactifs sont produits.

L'Agence de l'Énergie Nucléaire de l'O.C.D.E. définit un déchet radioactif comme "toute matière contenant des radionucléotides en concentration supérieure aux valeurs que les autorités compétentes considèrent comme admissibles dans les matériaux propres à une utilisation sans contrôle et pour laquelle aucun usage n'est prévu". Cependant, il n'existe actuellement aucun seuil international pour déterminer ce qui devrait ou ne devrait pas être considéré comme "radioactif" dans le cadre des conventions ou traités internationaux (LINSLEY, 1997). Il existe par contre une démarche internationale pour l'établissement des niveaux d'exemption et de libération qui pourrait servir de base à cette définition.

Parmi les principaux radioéléments rejetés, le plutonium 239 est un déchet produit par la filière des Réacteurs à Eau Pressurisée, mais est aussi utilisé comme combustible dans la filière des Réacteurs à Neutrons Rapides, ce qui évite de l'avoir comme déchet. Les autres principaux composés radioactifs sont le césium 135, l'iode 129 et le strontium 90.

La production de déchets radioactifs liquides ou solides de toute sorte intervient dans la totalité du cycle du combustible (BELHOSTE, DURAND et MACCIA, 1979). Selon l'étape du

cycle considérée, on distingue les stériles de minerai de faible activité, les déchets essentiellement d'origine technologique pour l'enrichissement et la fabrication, les filtres et les résines usées, ainsi que les concentrats d'évaporation et des déchets technologiques de faible et moyenne activité au niveau des réacteurs, les produits de fission de très haute activité spécifique, les déchets de gaines et les déchets de procédé en ce qui concerne l'usine de retraitement, et le plutonium lié au retraitement du combustible.

CHASSARD-BOUCHAUD (1995) nous explique que ces déchets sont classés en trois catégories (A,B et C) selon leur période (temps nécessaire pour que leur activité diminue de moitié) et leur rayonnement (alpha, bêta et gamma) (pour plus de précisions, consulter l'annexe 2). Leur retraitement a pour but de séparer l'uranium et le plutonium des produits de fission très actifs contenus dans les combustibles irradiés (BELHOSTE, DURAND et MACCIA, 1979). Ces derniers, après une période de refroidissement de un an dans des piscines de désactivation permettant une baisse importante de la radioactivité par disparition totale des radioéléments à courte période, sont transportés par route, rail ou mer des centrales à l'usine de retraitement de La Hague. Malgré cette phase de retraitement les déchets restent importants: krypton 85, iode 129, tritium, carbone 14.

Les déchets sont ensuite réduits, conditionnés dans des fûts, coulés dans du béton, recouverts d'une épaisse couche d'argile imperméable et de terre. Les déchets de faible activité sont stockés en surface jusqu'à ce que la radioactivité devienne négligeable. Ceux de moyenne et de haute activité posent un problème (MARSILY, 1997). Ils peuvent être vitrifiés, ou stockés en sous-sol, mais le choix du site de stockage est difficile devant les réticences du public et de leurs élus face à l'énergie nucléaire.

Risques pour la Santé : étude comparée

Nous avons vu jusqu'ici les cycles de chaque combustible utilisé pour produire de l'énergie à partir d'une centrale thermique ou d'une centrale nucléaire (revoir les figures 1 page 13 et 3 page 18).

Nous allons maintenant en examiner les conséquences sur la santé du Public, c'est à dire les personnes habitant près de ces centrales, du personnel intervenant dans les différentes phases de ces cycles, et sur l'environnement.

Nous aborderons ainsi, pour la production d'énergie thermique (charbon, fuel, gaz), les conséquences pour la santé d'une exposition au dioxyde de soufre, aux oxydes d'azote et aux oxydes de carbone. Nous verrons ensuite les risques spécifiques aux personnes exploitant cette filière de production d'énergie. Nous terminerons cette première partie par les répercussions de la production d'énergie thermique sur l'environnement: effet de serre, pluies acides, échauffement des eaux et accidents.

Dans une deuxième partie, concernant la production d'énergie nucléaire, nous aborderons d'abord la perception par le Public de ce type de production d'énergie, puis les effets des rayonnements ionisants. Nous verrons aussi les risques spécifiques concernant le personnel exploitant cette filière. Enfin, nous nous intéresserons aux conséquences environnementales, avec le problème de l'échauffement des eaux, le rôle de la radioécologie et les risques d'accidents.

Dans une troisième et dernière partie, nous essayerons de comparer ces deux modes de production d'énergie, en synthétisant les avis des différents auteurs sur le sujet.

I- Énergie thermique (charbon, fuel, gaz)

I.1- Risques pour le Public

La diffusion des polluants dans l'atmosphère entraîne certains niveaux de concentration au sol. Ce sont ces concentrations qui induiront éventuellement des effets nocifs sur la santé. L'existence et/ou l'importance de ces effets nocifs sur la santé dépendront de deux facteurs: les populations exposées, le niveau de concentration et la durée de l'exposition, autrement dit la "dose" (DURAND et BELHOSTE, 1979).

I.1.1- Le dioxyde de soufre (SO₂)

RAMSAY (1979) nous explique que le dioxyde de soufre rejeté par les centrales utilisant le charbon, et dans une moindre mesure le fuel, est à l'origine d'effets néfastes sur la population. Le dioxyde de soufre est en effet très irritant pour l'arbre bronchique.

On rencontre chez les adultes des maladies respiratoires chroniques, et chez les enfants des infections basses de l'arbre respiratoire. Dans les deux cas on note aussi une aggravation des symptômes cardiaques et pulmonaires et une augmentation des crises d'asthme.

DURAND et BELHOSTE (1979) précisent même que pour une forte pollution de courte durée on observe des crises d'asthme ou de dyspnée aiguë, des céphalées intenses, des poussées de rhinite allergique et des phénomènes d'irritation conjonctivale. Si cette pollution dure plusieurs jours, on note en plus des laryngo-trachéites, des infections pulmonaires surajoutées, une augmentation du nombre d'hospitalisation, une augmentation de la mortalité par affection respiratoire (bronchite et accidents cardiaques) et par cancer bronchogénique. L'exposition à long terme pour de faible dose provoque des bronchites chroniques, des maladies des voies respiratoires inférieures, une diminution de la fonction ventilatoire et une induction des cancers.

I.1.2- Les oxydes d'azote (NO₂ et NO)

Le monoxyde d'azote est une molécule potentiellement toxique dont la biochimie n'est pas complètement comprise (BAUD, LEVY et GEYE, 1996). Par réaction photochimique la molécule de monoxyde d'azote s'oxyde en dioxyde d'azote. Le monoxyde d'azote peut former des complexes avec les métaux de transition (Fe, Cu...) notamment ceux incorporés dans les métalloprotéines. Avec l'eau, le monoxyde d'azote et l'oxygène produisent un mélange d'acide nitrique et acide nitreux. Le monoxyde d'azote est aussi un puissant corrosif des métaux et réagit avec les plastiques.

Chez l'animal et chez l'homme, les oxydes d'azotes ont des propriétés méthémoglobinisantes. La méthémoglobine résulte de l'oxydation du fer de l'hémoglobine par un agent oxydant, autre que l'oxygène de l'air (BELEGAUD, BENOIT-GUYOD et MARZIN, 1993). Ce type d'intoxication entraîne une cyanose et des symptômes proportionnels au taux de méthémoglobine dans le sang: cyanose débutant aux extrémités des doigts et envahissant ensuite la face puis les

lèvres et toutes les muqueuses, céphalées, vertiges, polypnées, fatigabilité, tachycardie, et pour une méthémoglobinémie supérieure à 60% de l'hémoglobinémie totale: atteinte du système nerveux central, lésions neurologiques, troubles de la conscience, dépression respiratoire et arrêt cardiaque. La mort survient pour une méthémoglobinémie supérieure à 70% de l'hémoglobinémie totale.

Les oxydes d'azote montrent aussi des propriétés hémolytique (toxicité chronique) et mutagène (pour des concentrations élevées).

BAUD, LEVY et GEYE (1996) terminent leur monographie en indiquant les valeurs moyennes d'expositions (l'exposition du personnel sur les lieux de travail pendant 8 heures, en France), 25 parties par million (ppm) pour le monoxyde d'azote (soit 30 mg/m³) et 3 ppm pour le dioxyde d'azote (soit 6 mg/m³).

I.1.3- Les oxydes de carbone (CO₂ et CO)

Le monoxyde de carbone est un gaz incolore et non irritant, ayant une très forte affinité pour l'hémoglobine (250 fois supérieure à celle de l'oxygène). Le monoxyde de carbone, une fois inhalé, diffuse à travers la paroi alvéolaire, se dissout dans le sang et se fixe à l'hémoglobine pour former la carboxyhémoglobine (HbCO). Il possède aussi un caractère d'explosivité lié à la combustion incomplète du carbone.

Une intoxication aiguë au monoxyde de carbone ne présente pas de syndrome univoque (CHIRON, 1996). Il peut s'agir de nausées, vomissements, céphalées, asthénie, vertiges, douleur thoracique, palpitations, dyspnée, altération de l'humeur et/ou de la conscience. A l'examen on note des troubles de la fonction cardio-pulmonaire, voire un oedème pulmonaire et des atteintes neurologiques dont la gravité n'est pas toujours corrélée avec le taux de HbCO mesurée dans le sang. L'évolution va du décès à la guérison sans séquelles. Chez la femme enceinte on observe le décès du fœtus suite à l'hypoxie, ou des troubles de son développement cérébral avec des séquelles neurologiques.

Une intoxication chronique (à faible teneur) ne présente pas d'aspect cliniquement caractéristique. A long terme on observe des tableaux d'asthénie générale ou musculaire, céphalées, nausées, baisse de performance, voire troubles de la personnalité, confusion... Les horaires d'apparition de ces symptômes peuvent mettre sur la voie (coïncidence avec les heures de travail, rémission pendant le week-end, ou inversement selon la source professionnelle ou domestique). A long terme les faibles taux de HbCO sont suspectés d'être à l'origine du risque athéromateux.

Le dioxyde de carbone est un gaz incolore et inodore dans les conditions habituelles de température et de pression. Il ne devient dangereux que dans un milieu confiné, lorsque sa concentration atteint 10 à 20 000 ppm. Si le dioxyde de carbone est stimulant de la fonction respiratoire à de faibles concentrations, il a au contraire un effet dépresseur de cette fonction à de fortes teneurs. L'effet narcotique est pratiquement immédiat lors des intoxications aiguës. L'anoxie détermine des lésions cérébrales irréversibles. Lors d'expositions de courte durée à des concentrations plus faibles (80 000 ppm) on peut observer des malaises avec sensations

vertigineuses, céphalées, voire perte de connaissance. Enfin les expositions à de faibles teneurs (10 000 ppm) entraînent une hyperpnée semblable à celle résultant d'un effort physique intense. Elle s'accompagne d'une accélération du rythme cardiaque, d'une augmentation de la tension artérielle et d'une stimulation du système sympathique.

I.2- Risques pour le personnel exploitant

Nous avons vu jusqu'ici les risques généraux pour la santé du Public de la production d'énergie thermique. Cette section aborde plus spécifiquement les risques concernant le personnel exploitant ce mode de production. Bien entendu, ce personnel est aussi exposé aux risques pour la santé du Public.

I.2.1- La mine

Travailler dans une mine souterraine présente de nombreuses nuisances. Pour MAS (1996) on rencontre:

- Obscurité et éclairage parfois insuffisant sont la cause de nystagmus, mais ne sont plus très courants aujourd'hui. La claustrophobie est incompatible avec ce type d'activité.

- Chaleur et humidité favorables au développement de mycoses interdigitales et autres dermatoses (onyxis, perionyxis, irritations). Quelques rares cas d'ankylostomoses (maladie parasitaire) ont été décrits.

- Les poussières représentent la nuisance la plus préoccupante (aussi bien pour BELHOSTE, DURAND et MACCIA, 1979, que pour MAS, 1996). Si la généralisation du forage à l'eau a réduit l'incidence de la silicose (pneumoconiose due à l'inhalation de poussières riches en silice: SiO_2), on observe toujours des pneumoconioses avec lésions histologiques pulmonaires et nodules fibroconiotiques. Comme pour le risque amiante, le diagnostic se fait bien après l'exposition (25 ans en moyenne).

Les poussières contenant des traces de métaux sont aussi toxiques. Les métaux présentent en effet des pathologies qui leur sont propres (saturnisme pour une intoxication au plomb, altération de la cloison nasale lors de l'inhalation de nickel, etc...).

- Les fumées et les gaz peuvent contenir des isocyanates ou de l'aldéhyde formique à l'origine d'irritations et d'allergies.

Le grisou (gaz composé essentiellement de méthane) peut être à l'origine d'accidents graves dus à l'hypoxie ou aux brûlures consécutives à sa combustion soudaine.

- Les tirs d'explosifs émettent des fumées riches en monoxyde de carbone et en oxydes d'azote, pouvant entraîner des troubles broncho-pulmonaires aigus toxiques, ou retardés et durables (asthme).

- Le bruit est apparu avec la modernisation et la mécanisation des mines. Les effets du bruit sur la santé ont été décrits par MERYL (1996).

Un excès de bruit peut entraîner une fatigue auditive avec réduction de l'intelligibilité d'un message verbal, perturbation de la perception des signaux acoustiques, voire surdité. Le bruit provoque aussi des effets extra-auditifs: modification du rythme cardiaque, augmentation de la tension artérielle, perturbation du sommeil, diminution des performances physiques et intellectuelles.

Les mines à ciel ouvert emploient moins de personnel. Les nuisances du type obscurité et chaleurs sont faibles ou nulles. Par contre l'exposition aux intempéries et le travail posté sont la règle. Les accidents de roulage sont rares et parfois graves. L'exposition aux poussières demeure.

N.B.: Le travail posté (REINBERG, ANDLAUER et LEVI, 1996): il concerne les personnes ayant un décalage de plus de cinq heures avec leur cycle activité/repos. Ce phénomène se produit chez le personnel de garde la nuit (médecins, infirmières, policiers), le personnel navigant des compagnies aériennes, et les personnes pratiquant leur journée de travail en 3 x 8 (travail de 8 heures en continu dans la journée, de jour comme de nuit). Les nuisances de ce type de travail sont nombreuses: troubles du sommeil, fatigue persistante, troubles de la vigilance, troubles de l'humeur et troubles digestifs (dyspepsies, ulcères).

I.2.2- Le puits d'extraction et le transport

Malgré les nombreuses références bibliographiques, aucune ne mentionne l'impact sanitaire sur les travailleurs de l'extraction du pétrole et du gaz. BELHOSTE, DURAND et MACCIA (1979) pensent que l'importance des maladies professionnelles dans ce secteur est négligeable. MESLIN (1979) trouve étonnant que l'on se préoccupe si peu des conséquences des hydrocarbures, réputés pourtant dangereux pour la santé. Pour le transport, les risques semblent uniquement être liés aux accidents routiers, maritimes ou ferroviaires (collisions, naufrages, déraillements...). Pourtant, on peut se poser la question des répercussions psychologiques et physiologiques de l'isolement familial, de l'épuisement, de l'acclimatation au chaud ou au froid, et des pathologies liées aux pays (parasites alimentaires et autres).

I.2.3- La raffinerie, l'usine de traitement et la centrale thermique

Les personnes travaillant dans ces secteurs du cycle des combustibles sont eux aussi soumis à certaines nuisances. On retrouve le bruit, les poussières, les risques dus au gaz (hypoxie, combustion accidentelle) et les inconvénients du travail posté.

Plus spécifiquement, de part l'ancienneté de ces installations, le risque amiante est plus important. Quatre tableaux cliniques caractérisent la pathologie respiratoire en rapport avec l'inhalation de fibres d'amiante: fibrose pulmonaire, fibrose pleurale, cancer bronchique et mésothéliome (CHOUDAT et BROCHARD, 1996).

Le personnel est aussi exposé aux risques d'électrocution. Ce type d'accident reste cependant rare (FOLLIOU, 1996).

Les électrocutions dues à la basse tension (50 à 1000 volts) vont de la simple secousse électrique à l'accident grave: brûlures, hypoventilation ou ventilation inexistante, pouls non perceptible (état de mort apparente), fractures consécutives à une chute ou à une violente tétanisation.

Les électrocutions par haute tension (plus de 1000 volts) présentent les mêmes manifestations aggravées, avec un risque de mortalité important.

Les séquelles d'une électrocution sont de natures cardiologique (palpitations, troubles du rythme, angor), neurologique (troubles de la conscience, dépression, asthénie, troubles de la li-

bido), rénale (oligoanurie) et esthétique (brûlures). Certaines séquelles peuvent être à l'origine d'une invalidité permanente.

Enfin, régulièrement, il est nécessaire d'arrêter la chaudière de la centrale pour la nettoyer. En effet, comme pour une cheminée classique, il y a des dépôts de suie et de goudrons dans la cheminée d'une centrale. Le personnel chargé du ramonage est donc exposé à ces toxiques, qui peuvent engendrer, à long terme, un cancer testiculaire.

I.3- Environnement

I.3.1- L'effet de serre

Le rayonnement émis par le soleil est pour une faible partie absorbé par l'atmosphère, une autre partie est diffusée dans toutes les directions par les nuages et l'atmosphère, et une partie importante est absorbée par le sol. Le sol renvoie à son tour vers l'espace cette énergie sous forme de chaleur rayonnante infrarouge, chaleur qui se trouve pour une part retenue, piégée par les gaz à "effet de serre" présents dans l'atmosphère. Il en résulte une élévation de la température de l'air de la basse atmosphère. C'est cet échauffement de l'atmosphère par l'absorption des infrarouges émis à la surface du sol que l'on nomme "effet de serre". Dans une serre, les rayons du soleil chauffent à travers les vitres, les plantes et la chaleur produite reste en grande partie piégée à l'intérieur (CHASSARD-BOUCHAUD, 1995).

Vapeur d'eau, dioxyde de carbone, monoxyde de carbone, méthane, oxydes d'azote et ozone sont des gaz à "effet de serre". Ce sont des gaz qui laissent passer le rayonnement solaire incident mais qui absorbent les rayonnements infrarouges de grande longueur d'onde renvoyés par la surface de la Terre, les empêchant ainsi de s'échapper vers l'espace.

L'importance des rejets de ces gaz par l'activité humaine, dont la production d'énergie tient une part importante, va donc entraîner à long terme un réchauffement non négligeable de la planète. Toujours selon CHASSARD-BOUCHAUD (1995), si rien n'est fait pour maîtriser le réchauffement de l'atmosphère par "effet de serre", la température globale menace d'augmenter de 0,3°C par décennie. Cette élévation risque de provoquer des bouleversements climatiques considérables: hausse du niveau des mers, désertification, sécheresse, etc... LEWINO (1997) va même plus loin en terme de Santé Publique en prévoyant une expansion des maladies tropicales (paludisme, fièvre jaune, dengue, "cécité des rivières"...) consécutive à ce changement.

I.3.2- Les pluies acides

La pluie est naturellement légèrement acide du fait du dioxyde de carbone normalement présent dans l'atmosphère et dissous dans l'eau sous forme d'acide carbonique (FREMLIN, 1985). Cet acide est facilement neutralisé par les minéraux alcalins présents dans le sol en temps normal. Si le sol est capable de tolérer jusqu'à 10 fois l'acidité produite par le CO₂ seul, en ajoutant l'acidité résultant des rejets de SO₂ et de NO et NO₂, il ne peut tolérer 100 fois plus. Cette acidité qui n'est plus neutralisée va entraîner de nombreux dommages sur l'environnement sous la forme de "pluies acides".

Les dommages les plus facilement mesurables se rencontrent dans les lacs Scandinaves, Canadiens et Américains. L'accumulation d'acide a entraîné la disparition de toutes les espèces animales (dont les poissons) et végétales de ces lacs, d'où leur apparence claire et transparente. CHESTER (1986) nous rappelle que les forêts sont aussi concernées par les pluies acides. De nombreuses espèces d'arbre (sapin, hêtre, épicéa, pin) ne résistent pas à l'acidité. Ce phénomène est particulièrement visible dans le sud de l'Allemagne, notamment dans la Forêt Noire.

Les pluies acides touchent aussi les habitations et dégradent notamment le patrimoine historique.

I.3.3- L'échauffement des eaux

Une part majoritaire de l'énergie thermique produite par une centrale est rejetée à la source froide (BELHOSTE, DURAND et MACCIA, 1979). La manière dont cet échauffement se répartit dans le milieu aquatique environnant est fonction du comportement du panache d'eau chaude au rejet de la centrale. Ce phénomène va entraîner des effets thermiques directs et indirects sur l'environnement.

Les effets thermiques directs concernent surtout les poissons. Le risque de mortalité dû à un choc thermique est relativement réduit. Par contre, un échauffement de l'eau, en provoquant une anticipation de la période de reproduction, risque de placer les oeufs et les alevins dans des conditions écologiques défavorables, et de diminuer ainsi les possibilités de multiplication de certaines espèces.

Les variations de température affectent également les organismes animaux et végétaux peuplant le fond des cours d'eau. Certaines espèces vont en effet proliférer au détriment d'autres à l'aval des centrales (c'est le cas notamment des amibes et des leptospires).

Les effets thermiques jugés les plus importants concernent les organismes planctoniques transitant dans le circuit de refroidissement. Ils seront détruits par effet mécanique en franchissant les grilles et les conduites, puis par choc thermique.

Les effets thermiques indirects comprennent les effets sur la teneur en oxygène dissous dont les poissons d'eau douce ont besoin au delà d'une teneur minimale, les effets sur la toxicité de certains polluants modifiant la durée de résistance de certaines espèces, et les effets sur les germes pathogènes et les maladies parasitaires.

I.3.4- Les accidents

Pour BELHOSTE, DURAND et MACCIA (1979), les risques d'accidents lors de l'extraction du charbon, du fuel ou du gaz ne sont pas nuls. Les mines peuvent s'effondrer. Ce risque peut de plus persister et même s'accroître après l'arrêt de l'exploitation pendant plus de 50 ans.

Les déchets de la mine et surtout des usines de lavage sont entassés dans des terrils. Ils constituent une matière très inflammable. Les incendies sont donc assez fréquents. Ils présentent un risque pour les abords immédiats et pour ceux qui cherchent à les éteindre. Ils créent aussi une pollution atmosphérique très importante en dioxyde de soufre, oxydes d'azote, hydrocarbures et poussières. Les eaux de ruissellement sur un terril ne sont pas non plus sans conséquences. En plus des risques graves qu'elles font courir à la population (inondation accidentelle), elles causent une importante pollution aquatique.

Les risques d'accidents lors de l'extraction du pétrole brut et du gaz sont essentiellement des risques d'éruption qui pourraient entraîner une pollution, un incendie ou une explosion.

Le raffinage du pétrole présente les mêmes risques d'incendie ou d'explosion.

Le transport du charbon présente des risques d'accidents ferroviaire (collisions, déraillements), routier (collisions) ou maritime (naufrages, collisions). Leur impact sur l'environnement ne présente pas de danger majeur. Le risque d'explosion est nul, par contre un incendie est possible. La pollution des eaux par des particules en suspension (transport fluvial et carbo-duc) n'est pas négligeable.

Le transport du pétrole présente le plus de risques pour l'environnement. Les accidents de pétroliers sont assez fréquents et le déversement accidentel de pétrole en haute mer et près des côtes a un impact écologique et économique important.

Enfin une centrale thermique, lors de son fonctionnement, n'est pas non plus à l'abri d'un incendie ou d'une explosion. Même si le combustible a été traité, les conséquences de tels accidents ne sont pas négligeables pour l'environnement, avec le risque important de pollution atmosphérique que cela entraîne.

II- Énergie nucléaire

II.1- Risques pour le Public

II.1.1- La perception par le Public de la production d'énergie nucléaire

De nombreux auteurs abordent ce sujet. En effet, l'énergie nucléaire apparaît mal perçue par l'opinion publique.

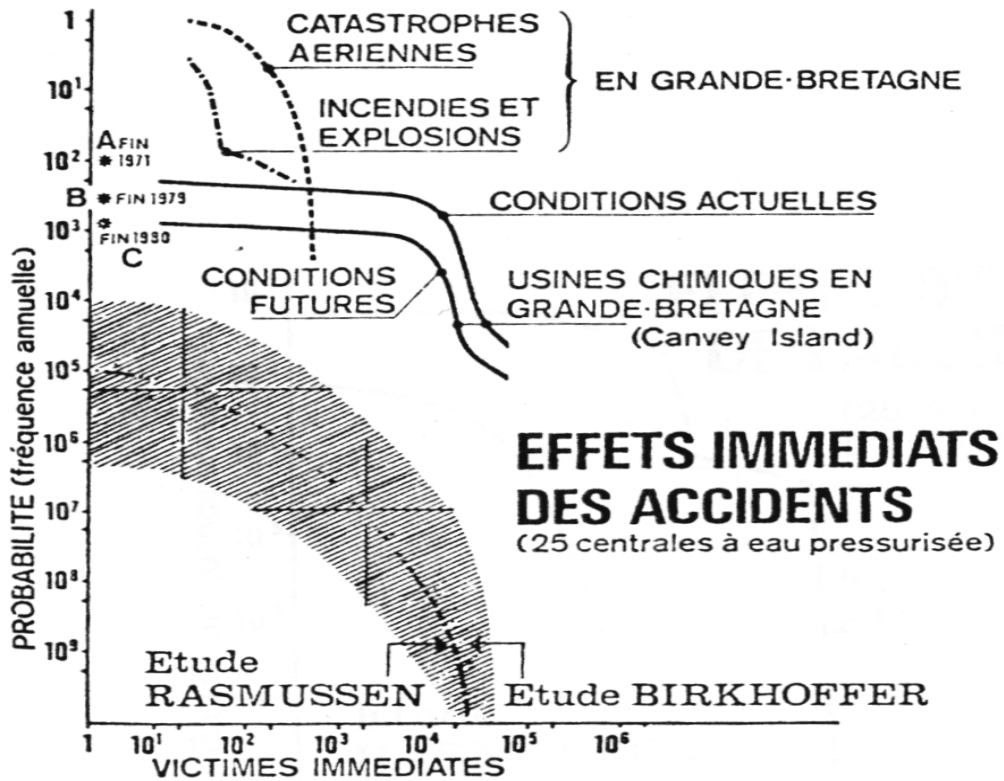
Pour FREMLIN (1985), la peur du nucléaire s'exprime en termes de danger majeur pouvant résulter de son utilisation quand on la compare aux autres sources d'énergie. FREMLIN précise d'ailleurs que les opposants au nucléaire oublient de mentionner les dangers de ces autres sources. De nombreuses personnes sont effrayées par l'énergie nucléaire bien que cette peur ne soit pas justifiée.

NIEHAUS et SWATON (1979) pensent que cette inquiétude vient de la perception des risques. SEAMAN (1988) explique que le degré de risque pour le public est toujours inférieur à celui des employés, ces derniers ayant accepté de travailler dans ce domaine d'activité. En fait les gens acceptent plus facilement un haut niveau de risque pour une activité qu'ils ont volontairement choisie, que pour une activité sur laquelle ils n'ont aucun contrôle.

GAUVENET (1982) remarque qu'aujourd'hui, au moins en apparence, on réagit vigoureusement contre certains risques spectaculaires, mais on oublie les autres. On tend ainsi à oublier le risque quotidien, individuel. Les statistiques montrent en effet que les accidents de type individuel (accidents d'automobiles, de travail) et les maladies causées ou aggravées par le tabac ou l'alcool provoquent beaucoup plus de victimes que les catastrophes tant redoutées. De même, on oublie que les risques encourus personnellement, le plus souvent en échange direct d'un avantage (automobile, tabac...) sont mieux acceptés que les risques abstraits ou collectifs dont les avantages individuels correspondants sont peu apparents.

La figure 10, page suivante, expose les probabilités d'accidents pouvant survenir de diverses activités humaines.

FIGURE 10: EFFETS IMMÉDIATS DES ACCIDENTS (D'APRÈS GAUVENET, 1982)



GAUVENET (1982) conclut avec cette figure en précisant que l'accident catastrophique, dont l'accident nucléaire, est statistiquement moins significatif que l'influence d'un risque quotidien ou d'une pollution.

Ce sont ces risques d'accidents que l'opinion publique n'accepte pas, aussi bien en ce qui concerne la production d'énergie nucléaire, que le stockage des déchets. Pour ces derniers, trois sites de stockage sont envisagés en France (MARSILY, 1997). Mais le problème étant mal perçu, la population refuse catégoriquement l'implantation d'un de ces sites dans leur département. Ce même problème a poussé certains pays à différer toute décision concernant la gestion et le stockage des déchets à haute activité.

II.1.2- Les effets des rayonnements ionisants

ABADIA et GIMENEZ (1996) recensent plusieurs types d'effets en fonction du type d'exposition (voir aussi les annexes 2 et 3).

Dans le cas d'une exposition externe globale, en deçà d'une dose absorbée de 1 Gy, il y a peu de signes cliniques chez la plupart des individus (parfois asthénie, céphalées et nausées). Au delà apparaissent les premiers signes constituant la phase prodromique. Ils surviennent dans les 24 heures suivant l'exposition: signes neurovégétatifs (céphalées, asthénie, tachycardie, hypotension), s'accompagnant de troubles digestifs à type nausées, vomissements avec parfois douleurs abdominales et troubles vasomoteurs. Le sujet doit être hospitalisé pour surveillance.

Au delà de 2 Gy, l'hospitalisation en service spécialisé est indispensable en raison de l'atteinte du système hématopoïétique. Les lymphocytes sont les cellules les plus radiosensibles, leur nombre diminue rapidement après l'exposition et reste abaissé pendant plusieurs semaines. Le nombre de granulocytes peut augmenter le jour de l'exposition avant de diminuer les jours suivants. La lignée mégacaryocytaire est également radiosensible, on observe une thrombopénie responsable de troubles hémorragiques. En pratique on constate donc une phase d'hyperleucocytose importante suivie d'une phase de latence de 3 semaines pendant laquelle s'installe une aplasie médullaire. C'est une période critique du fait des risques infectieux et hémorragiques. Le retour à la normale se fera en plusieurs mois.

Au delà de 6 Gy, aux syndromes prodromiques et hématopoïétiques qui sont majeurs, se surajoute un syndrome viscéral, gastro-intestinal, associant vomissements, diarrhées et hémorragie digestive. En absence de greffe de moëlle osseuse, la mort est quasi certaine. Les signes neurologiques apparaissent pour des doses absorbées supérieures à 10 Gy, aucune thérapeutique n'est efficace. Le sujet meurt rapidement en moins de 48 heures.

Dans le cas d'une exposition externe partielle, les effets pathologiques vont dépendre de la dose reçue et de l'organe concerné par l'irradiation.

Si la peau est atteinte, les lésions observées varient en fonction de la dose. Entre 3 et 8 Gy, on a apparition d'un érythème, au delà de 5 Gy on a une épidermite sèche qui devient exsudative entre 12 et 20 Gy. La peau se nécrosera pour une dose supérieure à 25 Gy. Des séquelles importantes, physiques et fonctionnelles, peuvent s'observer au delà de 10 Gy.

Si l'irradiation touche les gonades, une dose de 4 Gy suffit à entraîner une stérilité masculine. Les cellules germinales des testicules sont en effet très radiosensibles. Les ovaires ayant une radiosensibilité inférieure à celle des testicules, il faudra une dose de 8 Gy pour provoquer la stérilité.

En ce qui concerne l'oeil, le cristallin est la partie la plus radiosensible. Une radioexposition peut donc provoquer une cataracte dans des délais variables en fonction de la dose: plus de 5 ans pour des doses inférieures à 2 Gy, 1 an pour des doses supérieures à 10 Gy.

Les glandes endocrines sont en général assez résistantes, sauf la thyroïde pour laquelle les effets pourront être retardés de 10 à 15 ans avec apparition d'une hypothyroïdie.

Par ailleurs les rayonnements ionisants présentent des propriétés tératogènes. Le fœtus et l'embryon sont très radiosensibles, mais les effets varient en fonction du stade de développement.

Avant l'implantation de l'oeuf, les cellules sont indifférenciées, totipotentes. En cas de dose élevée reçue, il y a mort cellulaire et avortement qui passe inaperçu. Si une cellule survit, le développement continuera normalement (c'est la loi du "tout ou rien").

L'embryogenèse (jusqu'au soixantième jour de grossesse) est la période la plus radiosensible. Les ébauches des tissus et des organes de l'embryon (organogenèse) et sa forme (morphogène-

nèse) se mettent en place. Une irradiation pendant cette période risque d'induire des malformations, des maldéveloppements du système nerveux central.

Le stade foetal (au delà de 60 jours de grossesse) correspond à une phase de croissance du fœtus, ainsi qu'à une maturation des différents tissus le composant. Pendant cette période la fréquence des malformations diminue, ainsi que leur gravité. Une irradiation tardive au cours de ce stade peut entraîner des risques cancérogènes qui ne se révéleront qu'après la naissance. En pratique, il faut éviter d'irradier une femme enceinte, sauf examens médicaux urgents. En cas d'irradiation d'une femme dont la grossesse était méconnue, les conséquences pour le fœtus sont fonction du stade de la grossesse et des doses reçues, le premier trimestre étant la période la plus sensible.

Les rayonnements sont aussi responsables d'effets dits aléatoires, c'est à dire qu'ils concernent certains individus au hasard et sont indépendants de la dose reçue. Le temps de latence est de plusieurs années, ils vont atteindre soit le sujet (effet cancérogène), soit sa descendance (effet génétique).

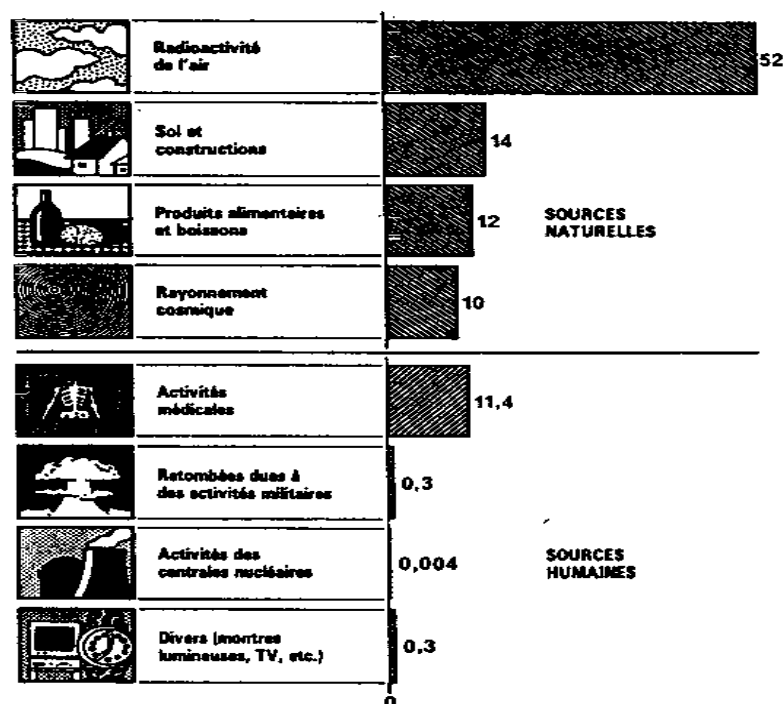
Les effets cancérogènes des rayonnements ionisants sont connus depuis le début du siècle. Il y a risque d'augmentation de l'incidence de certains cancers pour des doses supérieures à 1 Gy. Le problème qui demeure concerne l'effet des faibles doses (inférieures à 0,2 Gy).

Les effets génétiques sont provoqués par la mutation d'une cellule de la reproduction. Ils sont difficiles à mettre en évidence car l'incidence naturelle des anomalies génétiques est importante. Ces anomalies peuvent concerner soit les chromosomes (modification du nombre ou de la structure pouvant être dépistée par l'étude du caryotype), soit un ou plusieurs gènes sans qu'il y ait modification de la structure du chromosome. Ces dernières sont plus facilement transmissibles que les premières. Ces effets existent, mais ils sont trop faibles pour être détectés.

II.1.3- La radioprotection

Cette toxicité des radioéléments, provenant du combustible et de ses rejets, touche de prime abord le personnel exploitant qui est le plus exposé. Le Public est concerné dans une moindre mesure. La figure 11, page suivante, résume les sources de radioactivité d'origine naturelle et humaine, induisant une exposition aux radiations.

FIGURE 11: SOURCES NATURELLES ET HUMAINES INDUISANT UNE EXPOSITION AUX RADIATIONS
(D'APRÈS CHASSARD-BOUCHAUD, 1993)



Cette figure montre bien que, dans des conditions normales, le risque d'irradiation, ayant pour origine la production d'énergie nucléaire, est beaucoup plus faible qu'un risque d'irradiation d'origine naturelle.

Cependant, devant les graves conséquences pour la santé des rayonnements ionisants, une politique de radioprotection à l'échelon national, européen et international a été mise en place (ABADIA et GIMENEZ, 1996). Sur le plan international, une organisation spécifique émet des recommandations servant de références: la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR). Le tableau I, ci-dessous, a été élaboré par cette commission, et sert de référence à de nombreux pays, dont la France, en matière de protection des personnes.

TABEAU I: LIMITES D'EXPOSITION DANS LES CONDITIONS NORMALES DU TRAVAIL:
EXPOSITION EXTERNE EXCLUSIVE
(D'APRÈS ABADIA ET GIMENEZ, 1996)

Organe	Équivalent de dose (mSv)	
	12 mois consécutifs	3 mois consécutifs
En profondeur	50	30
Peau	500	300
Cristallin	150	90
Mains, avant-bras, pieds et chevilles	500	300
Femmes en état de procréer		12,5
Grossesse (abdomen)	Pendant la grossesse: 10 mSv	

II.2- Risques pour le personnel exploitant

Nous avons vu jusqu'ici les risques généraux pour la santé du Public de la production d'énergie nucléaire. Cette section aborde plus spécifiquement les risques concernant le personnel exploitant ce mode de production. Bien entendu, ici aussi, ce personnel est exposé aux risques pour la santé du Public.

II.2.1- La mine et le transport

Les nuisances rencontrées dans les mines d'extraction d'uranium sont quasiment les mêmes que celles des mines de charbon. On retrouve chaleur et humidité pour les mines souterraines, exposition aux intempéries pour les mines à ciel ouvert, et dans les deux cas: poussières, fumées, gaz, bruit et inconvénients du travail posté.

BELHOSTE, DURAND et MACCIA (1979) expliquent que les opérations d'extraction et de traitement des minerais d'uranium n'introduisent pas vraiment d'éléments radioactifs nouveaux dans l'environnement, car ces éléments y sont dispersés depuis toujours. Par contre les possibilités de transfert à l'homme de l'uranium et de ses descendants sont augmentés au cours de ces opérations.

L'irradiation du personnel des mines d'uranium est essentiellement due à trois types d'expositions différents: inhalation du radon, inhalation de poussières radioactives en suspension dans l'air, et irradiation externe.

Comme pour la production d'énergie thermique, la bibliographie est peu bavarde sur les nuisances engendrées par le transport du combustible depuis la mine jusqu'à l'usine d'enrichissement et de fabrication du combustible, puis jusqu'à la centrale. Les risques semblent, ici aussi, être uniquement liés aux accidents routiers, maritimes ou ferroviaires. Cependant on peut penser que du fait de la nature radioactive du combustible, le risque d'irradiation n'est pas nul.

II.2.2- L'usine d'enrichissement et la fabrication du combustible

Pour BELHOSTE, DURAND et MACCIA (1979), la fabrication du combustible pose peu de problème du point de vue de la radioprotection du personnel. Les produits manipulés sont en effet peu toxiques et les opérations de conversion sont essentiellement chimiques. Par contre, l'enrichissement pose un certain nombre de problèmes de protection du personnel.

II.2.3- La centrale nucléaire

Le personnel des centrales nucléaires est exposé à certaines nuisances communes avec les centrales thermiques: bruit, poussières, amiante (pour les centrales les plus vieilles), travail posté et électrocution.

Plus spécifiquement, il est aussi exposé à des risques propres à la production d'énergie nucléaire.

Le premier risque est celui de l'irradiation. Ce thème a déjà été évoqué pour le Public.

Une possibilité de fuite de fluide caloporteur existe.

Pour les centrales de la filière Uranium Naturel - Graphite - Gaz, il s'agit de dioxyde de carbone. La toxicité du dioxyde de carbone a déjà été traitée au chapitre I.1.3.

Pour les centrales de la filière Réacteurs à Eau Pressurisée, le fluide est de l'eau vaporisée. Le risque de brûlure par projection de vapeur n'est donc pas négligeable.

Pour les centrales de la filière Réacteurs à Neutrons Rapides, il s'agit de sodium liquide. CARLE (1993) nous rappelle que le sodium réagit très facilement avec l'eau pour donner de l'hydrogène et de la soude, et il brûle au contact de l'air. Les risques d'hypoxie due à l'hydrogène, et de brûlures sont alors importants.

Régulièrement le réacteur est soumis à des contrôles testant l'étanchéité du système. Le personnel est alors exposé à des conditions de travail rigoureuses. Il travaille en milieu hyperbare (la pression à l'intérieur du réacteur est élevée). GERAUT et al. (1996) expliquent que travailler dans ce type de milieu peut entraîner des risques d'accidents mécaniques, ou barotraumatismes:

- Une surpression pulmonaire survient lors d'une sortie du site hyperpressurisé soit trop rapide, soit à bouche fermée sans évacuation de l'air contenu en excès dans les voies respiratoires. Caractérisée par des douleurs thoraciques avec dyspnées variables et parfois par des crachats hémoptoïques dans sa forme mineure, elle peut cependant être mortelle. Ses complications sont d'ordre respiratoire avec apparition d'un pneumothorax, d'un emphysème, d'un état de choc, puis coma. Les formes les plus graves s'accompagnent d'embolie gazeuse cérébrale avec troubles visuels, paralysies brutales, crise comitiale et perte de connaissance.

- Lors de la décompression peut survenir une atteinte de l'oreille moyenne (cavité aérienne fermée par le tympan, en relation avec l'extérieur par l'intermédiaire de la trompe d'Eustache, et avec le milieu intérieur par les fenêtres ovale et ronde). Elle se caractérise par une douleur plus ou moins sourde, ou très aiguë, une sensation d'oreille bouchée, une hypoacousie. Le tympan peut alors se rompre. Cette rupture peut entraîner des vertiges plus ou moins marqués.

- Une atteinte de l'oreille interne et du système vestibulaire est plus rare et est consécutive à un barotraumatisme se transmettant à l'oreille interne. Elle se caractérise à la sortie du réacteur par une hypoacousie, une sensation d'oreille bouchée, accompagnée parfois de vertiges, état nauséux et vomissements.

- Une atteinte des sinus est rare mais très douloureuse, parfois marquée par un épistaxis.

- Une atteinte dentaire est possible suite à la diminution du volume d'air contenu dans la chambre pulpaire de dents cariées non ou mal traitées (irritation du nerf dentaire). Elle est caractérisée par des douleurs dentaires et gingivales. Le risque majeur est l'éclatement de la dent.

- Une atteinte digestive peut survenir par dilatation des gaz intestinaux entraînant une rupture de l'intestin ou de l'estomac. Les douleurs abdominales sont violentes et peuvent aller jusqu'à la syncope vagale.

Lors de l'opération de changement de combustible, on arrête le réacteur. Le personnel est alors exposé à la chaleur. GERAUT et DUPAS (1996) nous rappellent les effets pathologiques liés à la chaleur:

- Défaillance de la thermorégulation caractérisée par un coup de chaleur (accélération du pouls, visage cyanosé, peau rouge et chaude, dyspnées, vertiges, troubles visuels et risque d'état de choc), une insolation (symptômes identiques au coup de chaleur), et état d'épuisement (peau humide et pâle, somnolence, confusion, vertiges, vomissements, crampes musculaires, baisse de la pression artérielle jusqu'au collapsus).

- Mise en jeu excessive de la thermorégulation avec accidents de déshydratation (sudation importante, soif intense, pli cutané, baisse de la pression artérielle, de la diurèse, langue sèche, troubles de la conscience, délires), syncope de chaleur (stase veineuse périphérique avec hypotension artérielle et évanouissement), crampes de chaleur (précédées par des troubles de l'odorat et du goût, ce sont des contractions spasmodiques involontaires des muscles, et en premier des muscles fléchisseurs des doigts).

- Effets locaux avec oedème de chaleur (vasodilatation périphérique), mycoses (consécutives à la macération dans la sueur), urticaire à la chaleur (peu fréquent).

Pour travailler dans une centrale nucléaire, une personne doit donc être en excellente santé. Elle ne doit avoir aucun problème hépatique ou rénal (fonctions d'élimination intègres), ne pas avoir de cicatrices ou de lésions cutanées (le nettoyage y est plus difficile après contamination), avoir subi un examen oto-rhino-laryngologique approfondi avec vérification des tympanes, et une épreuve hyperbare (intégrité dentaire, sinusale, radiographie osseuse pour voir les risques de décalcification...).

II.2.4- L'usine de retraitement

Selon BELHOSTE, DURAND et MACCIA (1979), de tout le cycle du combustible, le retraitement est la phase potentiellement la plus délicate et la plus dangereuse, mais aussi la plus automatisée. Les opérations de retraitement associent, en effet, à des difficultés d'ordre technologique, des risques liés aux très hautes activités des éléments combustibles dégainés. L'essentiel des doses reçues par les travailleurs provient d'opérations de maintenance ou d'intervention effectuées dans des locaux contaminés, l'estimation étant faite par anthropogammamétrie (spectrométrie gamma).

II.3- Environnement

II.3.1- L'échauffement des eaux

Comme pour une centrale thermique, l'échauffement des eaux pose un problème à la sortie d'une centrale nucléaire, avec les mêmes répercussions sur l'environnement.

II.3.2- La radioécologie

La radioécologie étudie le cheminement et le devenir des radioéléments libérés dans l'environnement. Elle a pour but de déterminer depuis les sources d'émission, les voies (air, eau, sol, chaînes alimentaires) et les modalités d'atteinte de l'homme (CHASSARD-BOUCHAUD, 1993).

Les radionucléotides artificiels, rejetés dans l'environnement, vont se trouver assimilés par celui-ci. Ils seront captés par les végétaux, déposés sur, et retenus par, le sol, déposés sur l'eau avec mise en solution ou en suspension des particules solides ou liquides, transférés aux produits d'origine animale, puis transférés à l'homme (par la voie de la chaîne alimentaire).

Les mécanismes de transfert des radionucléotides dans les chaînes alimentaires terrestres et aquatiques sont très complexes. Certaines espèces sont capables de fixer sélectivement certains radionucléotides présents dans l'écosystème avec un facteur de concentration élevé (le facteur de concentration est le rapport entre la radioactivité de 1 kg d'un organisme aquatique et la radioactivité de 1 kg d'eau douce ou salée). Ils sont utilisés comme indicateurs radioécologiques, jouant le rôle de sentinelle ou de balise biologique au sein de l'environnement. On peut mettre ainsi en évidence les faibles variations de niveaux qui, sans eux, ne pourraient être détectés.

II.3.3- Les accidents

CHASSARD-BOUCHAUD (1993) nous rappelle que des accidents se sont déjà produits dans l'industrie nucléaire, accidents ayant entraîné une contamination radioactive de l'environnement. Leur sévérité étant variable, une échelle de gravité des accidents et incidents dans les réacteurs nucléaires a été établie: elle comporte huit niveaux caractérisés par différents critères (voir tableau II, page suivante).

La catastrophe de Three Miles Island, en 1979, aurait pu être catastrophique pour l'environnement. Les dégâts matériels ont été très importants, mais limités au réacteur car la quasi-totalité de la radioactivité est restée dans l'enceinte de confinement.

Pour Tchernobyl, en 1986, c'est une succession impressionnante d'imprudences, d'erreurs humaines, d'irresponsabilité et d'incompétence (CHASSARD-BOUCHAUD, 1993) qui en est la cause. De plus la centrale n'était pas pourvue d'enceinte de confinement (ce qui est le cas de la plupart des centrales de l'ex-U.R.S.S. construites sur le modèle des Réacteurs à Eau

Bouillante), d'où la libération brutale dans l'environnement de l'ensemble de la radioactivité échappée du coeur du réacteur, avec les conséquences que l'on connaît.

**TABLEAU II: ÉCHELLE DE GRAVITÉ DES ACCIDENTS ET INCIDENTS DANS LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES
(D'APRÈS UN DOCUMENT EDF, 1994)**

	Critères ou attributs liés à la sûreté		
	Incidences hors du site	Incidences sur le site	Dégradation de la défense en profondeur
7 Accident majeur	Rejet majeur - Effets étendus sur la santé et l'environnement		
6 Accident grave	Rejet important - Susceptible d'exiger l'application intégrale des contre-mesures prévues		
5 Accident entraînant un risque hors du site	Rejet limité - Susceptible d'exiger l'application partielle des contre-mesures prévues	Endommagement grave du coeur du réacteur / des barrières radiologiques	
4 Accident n'entraînant pas de risque important hors du site	Rejet mineur - Exposition du Public de l'ordre des limites prescrites	Endommagement important du coeur du réacteur / des barrières radiologiques / exposition létale d'un travailleur	
3 Incident grave	Très faible rejet - Exposition du Public représentant une fraction des limites prescrites	Contamination grave / effets aigus sur la santé d'un travailleur	Accident évité de peu - Perte des barrières
2 Incident		Contamination importante / surexposition d'un travailleur	Incidents assortis de défaillances importantes des dispositions de sûreté
1 Anomalie			Anomalie sortant du régime de fonctionnement autorisé
0 En dessous de l'échelle d'événements écart	Aucune importance du point de vue de la sûreté		
Hors échelle d'événements	Aucune pertinence du point de vue de la sûreté		

III- Comparaison

RAMSAY (1979) considère qu'il est difficile d'établir des conclusions dans la comparaison de la production d'énergie thermique avec la production d'énergie nucléaire. Dans chaque cas nous avons pu voir, en effet, que leurs impacts sur la santé et sur l'environnement étaient importants.

Les technologies thermique et nucléaire demandent toutes les deux un personnel scientifique et technique qualifié. L'auteur précise aussi que les mines et les puits d'extraction ont un impact régional en dégradant le paysage. Il en est de même pour les différents types de centrales. Cependant la production d'énergie thermique semble être la plus polluante pour l'environnement. Par contre si on regarde l'impact pour les générations futures, le problème des déchets nucléaires est le plus important.

Pour TANGUY (1982), le risque encouru par le personnel exploitant est sensiblement le même pour le nucléaire et le pétrole et plus élevé pour le charbon. Par contre, pour le Public et l'environnement le risque nucléaire est inférieur à celui des autres formes d'énergie. L'auteur précise tout de même qu'un grand travail de recherche demeure nécessaire.

Pour GAUVENET (1982), il est clair que la production d'électricité d'origine nucléaire peut présenter un niveau de risque élevé. Si l'on considère les énergies d'origine thermique, seul le gaz naturel est plus avantageux que le nucléaire. L'auteur admet cependant qu'il n'a pas tenu compte des effets à long terme possibles du gaz carbonique dans l'atmosphère, nuls dans la cas du nucléaire. Négliger ces effets à long terme du gaz carbonique, alors que l'on prend en compte de façon impérative les problèmes à long terme des déchets radioactifs, c'est d'une certaine façon désavantager le nucléaire.

ETNIER et TRAVIS (1983) concluent dans leur article que l'énergie nucléaire produit le moins d'impact sur la santé, et l'énergie thermique le plus, les énergies renouvelables (vent, soleil, marée) se situant entre les deux.

FREMLIN (1985) ne comprend pas la peur du Public face à la production d'énergie d'origine nucléaire. Pour lui, les opposants au nucléaire exagèrent le risque d'accidents encourus et profitent de cette peur pour influencer l'opinion publique.











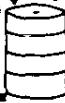




Pour l'auteur, les raffineries de pétrole et de gaz entraînent les accidents les plus sérieux. Les combustibles utilisés dans la production d'énergie thermique causent beaucoup plus de décès par unité d'énergie produite. Les polluants chimiques rejetés par les centrales thermiques sont plus cancérigènes que les irradiations dues à la production et aux déchets d'origine nucléaire.

CARLE (1993) propose, pour rassurer le Public sur la production d'énergie nucléaire, de gagner et de conserver sa confiance en améliorant les méthodes d'information auprès de lui, et notamment en favorisant la communication en cas de crise (il faut faire preuve d'une "transparence" immédiate). Pour l'auteur l'électricité nucléaire est un avantage écologique pour l'environnement, c'est aussi, sur le plan économique, une électricité moins chère.

CHASSARD-BOUCHAUD (1995) estime que la production d'électricité nucléaire peut contribuer à la réduction de l'effet de serre et des pluies acides.

Le tableau III, ci-dessous, compare l'impact exercé par une centrale thermique utilisant le charbon comme combustible et une centrale nucléaire.

TABLEAU III: COMPARAISON DE L'IMPACT EXERCÉ PAR UNE CENTRALE À CHARBON ET UNE CENTRALE NUCLÉAIRE (D'APRÈS CHASSARD-BOUCHAUD, 1993)

	CHARBON	NUCLÉAIRE
CONSUMMATION DE COMBUSTIBLE	2,3 MILLIONS DE TONNES 	27,2 TONNES 
CONSUMMATION D'OXYGÈNE	4,2 MILLIARDS DE M ³ 	○
EAU DE REFROIDISSEMENT	950 MILLIONS DE M ³ 	1.100 MILLIONS DE M ³ 
REJETS THERMIQUES		
•EAU DE REFROIDISSEMENT	9 MILLIARDS DE kWh 	12,3 MILLIARDS DE kWh 
•A LA CHEMINÉE	2,5 MILLIARDS DE kWh 	○
ACTIVITE REJETEE	7.10 ⁸ Bq 	4.10 ⁻¹⁴ Bq 
DECHETS SOLIDES	250.000 TONNES	HAUTE ACTIVITE 14 M ³ 
GAZ CARBONIQUE	3 MILLIARDS DE M ³ 	○
SOUFRE (SO ₂)	41.000 TONNES 	○
OXYDES D'AZOTE (NO ₂)	9,6 MILLIONS DE M ³ 	○
POUSSIÈRES	1.200 TONNES 	○

CHASSARD-BOUCHAUD (1995) pense que la société actuelle va évoluer vers une écologie nucléaire, étant donné que l'exploitation des énergies renouvelables n'est pas encore au point. Elle cite aussi Marcel Boiteux (1993), à propos du nucléaire:

« Le vrai problème du nucléaire est un problème de société. Il est humainement sûr et ses bienfaits écologiques sont bons à prendre, dans une société évoluée dont les régulations fonctionnent convenablement, où les organismes chargés de la sécurité allient la compétence et la rigueur morale, où les constructeurs sont fiables, où les exploitants respectent les procédures, où les agents d'entretien ont la religion de la maintenance. Le nucléaire est dangereux dans un pays où le respect des normes est mal contrôlé, dans un pays où les disciplines industrielles n'ont pas pénétré les moeurs, dans un pays où la maintenance est peu gratifiante et n'intéresse pas les ingénieurs. »

RAMSAY (1979) conclut:

- Tant que la préservation de la santé est concernée, l'impact de la production d'énergie thermique est plus important que celui de la production d'énergie nucléaire, son importance dépendant fortement des effets de la pollution de l'air sur la santé.

- L'impact de la production d'énergie thermique est aussi supérieur à celui de la production d'énergie nucléaire en ce qui concerne l'environnement et les ressources.

- L'impact de la production d'énergie nucléaire a plus de chance, à court terme, d'être catastrophique en cas d'accidents, les catastrophes associées à la production d'énergie thermique étant plus une menace à long terme et ayant plus de chance d'être réversibles.

- L'impact de la production d'énergie nucléaire est enfin plus important quand on tient compte de l'équité des réflexions de l'opinion publique. La nature intraitable de cette dernière, plus que son importance, est le critère clé du problème.

Conclusion

THÈSE SOUTENUE PAR M. BERTRAND SYLVAIN.

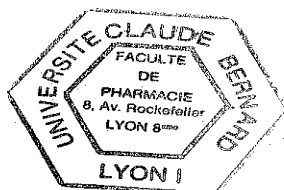
Nous avons donc recensé l'ensemble des risques pour la santé de la production d'énergie nucléaire et thermique (charbon, fuel, gaz). Pour ce qui est de les comparer, les avis restent partagés, bien que la majorité des auteurs considèrent la production d'énergie nucléaire comme la plus sûre actuellement.

La production d'énergie nucléaire continuera à se développer en France et dans le monde du prochain siècle, jusqu'au moment où d'autres ressources pourront prendre le relais.

L'industrie nucléaire, en partie parce qu'elle provoque des craintes, en partie parce que les radiations sont étudiées sérieusement depuis 50 ans au moins, dispose de dossiers de risques particulièrement sérieux, notamment dans le domaine de la pollution.

La présentation des risques fait apparaître des catégories très distinctes. Il est difficile de trouver une unité commune de mesure pour les victimes d'accidents et pour les maladies différées de la pollution. De plus, pour toutes sortes de raisons qui tiennent à l'intérêt que l'on prend personnellement à telle ou telle activité, au plaisir que l'on en retire, à la publicité donnée à certains risques, à la difficulté d'appréhender la notion de probabilité, il n'existe pratiquement aucune corrélation entre le risque estimé et le risque perçu.

Pour satisfaire les besoins en énergie de l'humanité d'aujourd'hui, toutes les ressources disponibles doivent être mises à contribution, aucune n'étant totalement inoffensive, aucune n'étant sans inconvénient. Le risque est de ne pouvoir faire face à la demande de mieux vivre d'une population en croissance constante et d'épuiser les ressources fossiles accessibles à un coût raisonnable. Il reste donc qu'il faut poursuivre les études sur les différents moyens de production d'énergie, penser au long terme et continuer à lutter pour la meilleure protection possible de l'homme et de l'environnement, compatible avec les conditions économiques et sociales. Dans ce contexte, le nucléaire est particulièrement bien placé.



Vu, le Doyen de la Faculté de Pharmacie,

Pr. C. COLLOMBEL

Le Président de la thèse,

Pr. P. CHAMBON

Signature:

VU, ET PERMIS D'IMPRIMER

Lyon, le 6/11/97

Vu, le Président de l'Université Claude Bernard

Pr. M. DECHAVANNE

Annexes

Annexe 1: Définitions

D'après le Petit Robert (1988):

Énergie: Au sens physique: "ce que possède un système s'il est capable de produire un travail".

Unité Internationale: le joule (J)

En électricité, unité: le wattheure (Wh) sachant qu'un watt vaut un joule par seconde ($1W=1J/s$). Le wattheure est une unité de travail et d'énergie, il correspond à l'énergie fournie en une heure par une puissance de un watt.

Source d'énergie: "système, substance, ou objet qui fournit de l'énergie". Il s'agit donc d'un système capable de produire un travail.

Annexe 2: Rappel sur les rayonnements ionisants

LE TALAER (1993) nous rappelle quelques définitions sur les rayonnements ionisants:

Le rayonnement:

C'est de l'énergie en mouvement qui se propage dans l'air sous la forme d'une onde ou d'un flux de particules. Ils sont dits ionisants si leur énergie est suffisamment élevée pour qu'ils soient capables de provoquer l'ionisation d'une molécule d'air. Pour ioniser une molécule d'eau ou d'air, une particule doit avoir une énergie supérieure à 14 électronvolts (eV). L'énergie des rayons X variant entre 1000 eV et quelques dizaines de millions d'eV, ils sont donc ionisants.

Type de rayonnements ionisants:

- Electromagnétiques (rayons X ou gamma).
- Particules chargées: alpha (α), bêta⁻ (β^- ou négaton) et bêta⁺ (β^+ ou positon).
- Particules non chargées: neutrons.

Les particules α :

Ce sont des noyaux d'hélium de masse égale à 7000 fois celle de l'électron, des particules lourdes d'énergie comprise entre 1,8 MeV et 8,7 MeV, et plus généralement entre 4 et 8 MeV. Leur parcours est rectiligne, du fait de leur masse, ils ne sont pas déviés. Un parcours dans l'air, fonction de leur énergie, peut être de l'ordre de quelques cm et de quelques microns dans les tissus.

Ces particules lourdes cèdent leur énergie par petites fractions au cours d'un grand nombre de chocs avec les électrons, particules légères des atomes qui se trouvent ainsi excités ou ionisés. L'ionisation spécifique varie le long de la trajectoire sur laquelle la particule dissipe son énergie. Étant donné leur très grande énergie et leur faible parcours, les particules α sont très ionisantes.

Les particules β :

Les négatons sont des électrons qui ne sont pas monoénergétiques mais distribués selon un spectre d'énergie caractéristique du radioisotope. Leur énergie est comprise entre 18 keV et 13 MeV. Plus généralement, le domaine d'énergie se situe entre 18 keV et 3 MeV. Leur parcours est très sinueux, par suite de la diffusion coulombienne. Au cours de leur déplacement dans la matière, les électrons, particules légères, subissent en effet un grand nombre de collisions avec faibles pertes d'énergie. Ceci entraîne un pouvoir élevé de rétrodiffusion de ces particules. Leur parcours dans l'air va de quelques mm à quelques dizaines de mètres. Dans la matière, leur parcours varie en raison inverse de la densité.

Ces particules engendrent des phénomènes d'excitation et d'ionisation. Leur masse plus faible et leur charge plus petite les rendent beaucoup moins ionisants que les particules α . Lorsqu'un électron passe au voisinage d'un atome, il subit un changement de direction et un freinage. Il perd une partie de son énergie qui est rayonnée sous forme de photons, constituant le rayonnement de freinage.

Les positons ne se distinguent des négatons que par leur signe de charge électrique. Quand leur énergie est tombée à une valeur très faible (inférieure à 1 eV), ils s'annihilent en rencontrant un électron. Dans ce processus, les deux charges s'annulent et les deux masses disparaissent en créant deux rayonnements gamma (γ) émis à 180 degrés dans des directions opposées.

Les rayons X et γ :

Ce sont des rayonnements électromagnétiques, comme les UV et la lumière. Les rayons X résultent soit du ralentissement des électrons dans la matière (rayonnement de freinage), soit du changement de niveaux d'énergie des électrons de l'atome (photons de fluorescence). La différence essentielle entre les X et les γ réside dans leur mode de production. Les premiers prennent naissance au niveau du cortège électronique (rayonnement de freinage ou de fluorescence), alors que les seconds sont issus du noyau de l'atome (désexcitation).

Les modes d'exposition aux rayonnements ionisants:

On peut s'exposer à trois types de risques:

- *Irradiation externe*: on se trouve sur les trajets du rayonnement émis par des substances radioactives situées à l'extérieur de l'organisme.

Les rayons X et γ sont en cause car leur parcours est important et ils peuvent pénétrer profondément dans le corps humain. Dans certaines situations les bêta peuvent aussi présenter un risque d'irradiation externe, le risque étant plus grand si le radioélément est déposé sur la peau, ou si l'énergie du rayonnement est supérieure à 65 keV.

Si tout l'organisme est atteint, il y a irradiation totale, si une partie seulement est atteinte, il y a irradiation partielle.

- *Irradiation interne*: elle est réalisée lorsqu'un radioisotope pénètre dans l'organisme par voie digestive, respiratoire, ou est absorbée par la peau ou les muqueuses, ou au niveau de lésions de celle-ci. Le risque dû à ces expositions peut également varier selon l'importance de la dose absorbée, le débit, la durée de l'irradiation, qui peuvent entraîner des effets de type aigu (explosion nucléaire) ou chronique s'étalant dans le temps (retombées de poussières radioactives).

Les rayonnements α sont les plus dangereux au contact des cibles biologiques car fortement ionisants.

- *Contamination*: elle est provoquée par la présence de radionucléotides dans un milieu. Dans l'environnement, elle peut affecter l'atmosphère, l'hydrosphère (mer et eaux douces), ou les milieux terrestres. Elle peut atteindre les aliments et les organismes vivant dans les différents milieux. En cas de contamination humaine, elle peut entraîner des risques d'irradiation externe ou interne.

Classification des déchets nucléaires:

- *Type A*: ce sont des déchets de faible et moyenne radioactivité à vie courte (qui diminue de moitié tous les trente ans). Résultant des opérations d'exploitation, ils représentent 90% des déchets nucléaires.

- *Type B*: ce sont des déchets de faible et moyenne radioactivité mais à vie longue. Principalement constitués des tubes et embouts métalliques entourant le combustible, ils représentent 9,5% des déchets radioactifs.

- *Type C*: ce sont des déchets de forte radioactivité. Produits issus des réactions de fission, ou actinides mineurs, ils représentent 0,5% des déchets radioactifs. Ils sont traités selon un procédé de vitrification.

Annexe 3: Unités de mesure utilisées dans le domaine nucléaire

D'après CHASSARD-BOUCHAUD (1993):

La radioactivité: l'activité d'un radionucléotide représente le nombre d'atomes radioactifs qui se désintègrent pendant une unité de temps. On l'exprime en *becquerel (Bq)*, 1 becquerel = 1 désintégration par seconde.

La dose absorbée: les rayonnements ionisants cèdent de l'énergie à la matière qu'ils traversent: ce "transfert d'énergie" ou dose absorbée s'exprime en *gray (Gy)*, 1 gray = 1 joule/kg de matière.

L'équivalent de dose: lorsque la matière traversée est un organisme vivant, on évalue la nocivité potentielle de la dose absorbée en *sievert (Sv)*: on parle d'équivalent de dose pour traduire le fait que, pour une même dose absorbée, l'effet produit sur le vivant dépend de la nature du rayonnement.

Le tableau IV, ci-dessous, résume ces définitions.

TABLEAU IV: UNITÉS UTILISÉES EN RADIOPROTECTION
(D'APRÈS CHASSARD-BOUCHAUD, 1993)

Unités utilisées en radioprotection		
	Unité S.I. ^(*)	Ancienne unité
Activité	BECQUEREL (Bq) 1 Bq = 1 désintégration par seconde 1 Bq = 27.10 ⁻¹² Ci = 27 p Ci	CURIE (Ci) 1 Ci = activité d'1 g de 226 Ra 1 Ci = 37.10 ⁹ Bq
	A noter : 1 Ci est énorme par rapport à 1 Bq En effet : 1 Ci = 37 000 000 000 Bq ou encore : 1000 Bq = 0,000 000 027 Ci	
	Unités S.I. ^(*)	Anciennes unités
Dose absorbée	GRAY (Gy) 1 Gy = 1 J/kg 1 Gy = 100 rad	RAD 1 rad = 0,01 Gy = 1c Gy
Équivalent de dose	SIEVERT (Sv) 1 Sv = 100 rem	REM 1 rem = 0,01 Sv = 1c Sv

(*) Unités légales depuis le 1^{er} janvier 1986. Ce changement d'unités est imposé par la loi afin de rendre cohérent l'ensemble des unités utilisées.
Facteurs multiplicatifs appliqués à l'unité :

kilo	K	1 000 (10 ³)
méga	M	1 000 000 (10 ⁶)
giga	G	1 000 000 000 (10 ⁹)
téra	T	1 000 000 000 000 (10 ¹²)
milli	m	0,001 (10 ⁻³)
micro	μ	0,000 001 (10 ⁻⁶)
nano	n	0,000 000 001 (10 ⁻⁹)
pico	p	0,000 000 000 001 (10 ⁻¹²)

Bibliographie

☞ ABADIA G., GIMENEZ C.

Effets des rayonnements ionisants

In Encyclopédie Médico-Chirurgicale: Toxicologie, pathologie professionnelle
Éditions scientifiques et médicales Elsevier, 1996, 2, réf. 16510A10, 8 p.

☞ ABADIA G., GIMENEZ C.

Radioprotection

In Encyclopédie Médico-Chirurgicale: Toxicologie, pathologie professionnelle
Éditions scientifiques et médicales Elsevier, 1996, 3, réf. 16700A10, 8 p.

☞ ANONYME

La centrale nucléaire de Creys-Malville

Documentation E.D.F., 1980, plan

☞ ANONYME

Les centrales nucléaires

Documentation E.D.F., 1983, 22 p.

☞ ANONYME

Les centrales thermiques à flamme

Documentation E.D.F., 1985, 22 p.

☞ ANONYME

Mémento de la sûreté nucléaire en exploitation

Documentation E.D.F., 1994, 348 p.

☞ ANONYME

Sûreté et radioprotection des centrales nucléaires à eau sous pression

Documentation E.D.F., date inconnue, réf. H45, 35 p.

☞ ANONYME

Surgénérateur et plutonium

Documentation E.D.F., 1979, 24 p.

☞ BAUD F.J., LEVY D., GEYE P.N.

Monoxyde d'azote

In Encyclopédie Médico-Chirurgicale: Toxicologie, pathologie professionnelle
Éditions scientifiques et médicales Elsevier, 1996, 1, réf. 16002A55, 8 p.

☞ BELEGAUD J., BENOIT-GUYOD J.L., MARZIN D.

Poisons hémolytiques de l'hémoglobine

In Le moniteur internat, 1993, 1, 327-366

☞ BELHOSTE J.F.

Les pneumoconioses du mineur de charbon

Rapport n°20-2(1)

Centre d'étude sur l'évaluation de la protection dans le domaine nucléaire, 1979, 75 p.

☞ BELHOSTE J.F., DURAND B., FAGNANI F., MACCIA C.

Risques sanitaires et écologiques de la production d'énergie électrique. Cycle nucléaire, fuel, charbon

Rapport n°20-1

Centre d'étude sur l'évaluation de la protection dans le domaine nucléaire, 1979, 49 p.

☞ BELHOSTE J.F., DURAND B., MACCIA C.

Risques sanitaires et écologiques de la production d'énergie électrique. Cycle nucléaire, fuel, charbon

Rapport n°20-3

Centre d'étude sur l'évaluation de la protection dans le domaine nucléaire, 1979, 194 p.

☞ CARLE R.

L'électricité nucléaire

Presses Universitaires de France, 1993, collection "Que sais-je?", n°2777, 128 p.

☞ CHASSARD-BOUCHAUD C.

Environnement et radioactivité

Presses Universitaires de France, 1993, collection "Que sais-je?", n°2797, 128 p.

☞ CHASSARD-BOUCHAUD C.

L'écotoxicologie

Presses Universitaires de France, 1995, collection "Que sais-je?", n°2931, 128 p.

☞ CHESTER P.F.

Coal-fired generation: developments in emission control and advanced technologies

In International Electric Exchange, 1986, 20 p.

☞ CHIRON M.

Intoxication oxycarbonée, intoxication par le gaz carbonique

In Encyclopédie Médico-Chirurgicale: Toxicologie, pathologie professionnelle

Éditions scientifiques et médicales Elsevier, 1996, 1, réf. 16002B50, 5 p.

☞ CHOUDAT D., BRICHARD P.

Maladies respiratoires professionnelles dues aux particules minérales

In Encyclopédie Médico-Chirurgicale: Toxicologie, pathologie professionnelle

Éditions scientifiques et médicales Elsevier, 1996, 2, réf. 16519A10, 11 p.

☞ COULON R., AIGUEPERSE J., ANGUENOT F.

A regional approach to risk assesment and management: experience gained from the "grand delta" project

In Assessing and managing health and environmental risks from energy and other complex industrial systems

Agence Internationale pour l'Énergie Atomique, 1988, 43-56

☞ DURAND B., BELHOSTE J.F.

Risques sanitaires et écologiques de la production d'énergie électrique. Cycle nucléaire, fuel, charbon

Rapport n°20-2(1)

Centre d'étude sur l'évaluation de la protection dans le domaine nucléaire, 1979, 142 p.

☞ ETNIER E.L., TRAVIS C.C.

Risk of energy technology

Nuclear safety, 1983, 24, 5, 671-676

☞ FOLLIOU D.

Accidents dus à l'électricité

In Encyclopédie Médico-Chirurgicale: Toxicologie, pathologie professionnelle

Éditions scientifiques et médicales Elsevier, 1996, 2, réf. 16515A10, 15 p.

☞ FREMLIN J.H.

Power production: What are the risks?

Adam Hilger Ltd., 1985, 318p.

☞ GAUVENET A.

Risques liés à la production d'énergie d'origine nucléaire. Comparaison avec les autres sources d'énergie

Énergie et société, 1982, 421-437

☞ GERAUT Ch., DUPAS D.

Travail à la chaleur

In Encyclopédie Médico-Chirurgicale: Toxicologie, pathologie professionnelle

Éditions scientifiques et médicales Elsevier, 1996, 2, réf. 16500B10, 6 p.

☞ GERAUT Ch., SIMON C., DUPAS D., BELLEC J.M.

Risques de la plongée sous-marine et du travail en milieu hyperbare

In Encyclopédie Médico-Chirurgicale: Toxicologie, pathologie professionnelle

Éditions scientifiques et médicales Elsevier, 1996, 3, réf. 16560A10, 8 p.

☞ HUBERT P.

Occupational risk induced by construction of energy production chains. Methodology and evaluation in France

Agence Internationale pour l'Énergie Atomique, 1981, 655-663

☞ KEMPF H.

L'entreposage provisoirement définitif ?

La Recherche, septembre 1997, 301, dossier "Les déchets nucléaires", 79-81

☞ LE PETIT ROBERT

Dictionnaire de la langue Française

Dictionnaire Le Robert, 1988, 2174 p.

☞ LE TALAER J.Y.

Toxicologie des radioéléments

In Le moniteur internat, 1993, 1, 311-325

☞ LEWINO F.

Climats: Ce qui va changer

Le Point, août 1997, 1298, 48-51

☞ LINSLEY G.

Le besoin de seuils internationaux pour la gestion des déchets radioactifs

Contrôle, août 1997, 118, dossier "La gestion des déchets très faiblement radioactifs", 43-45

☞ LOCHARD J., MOATTI J.P.

Experience of CEPN in the field of risk assessment and risk management: perspectives for future developments

In Assessing and managing health and environmental risks from energy and other complex industrial systems

Agence Internationale pour l'Énergie Atomique, 1988, 401-413

☞ MARSILY G.

Le stockage profond exige encore des études complexes

La Recherche, septembre 1997, 301, dossier "Les déchets nucléaires", 70-74

☞ MAS A.

Travail dans les mines

In Encyclopédie Médico-Chirurgicale: Toxicologie, pathologie professionnelle

Éditions scientifiques et médicales Elsevier, 1996, 3, réf. 16539D10, 6 p.

☞ MERY J.

Le bruit

In Encyclopédie Médico-Chirurgicale: Toxicologie, pathologie professionnelle

Éditions scientifiques et médicales Elsevier, 1996, 3, réf. 16781A30, 5 p.

☞ MESLIN T.

Risques sanitaires et écologiques de la production d'énergie électrique. Cycle nucléaire, fuel, charbon

Rapport n°20-2(2)

Centre d'étude sur l'évaluation de la protection dans le domaine nucléaire, 1979, 76 p.

☞ NIEHAUS F., SWATON E.

La perception par l'opinion publique des risques liés à la production d'énergie
Commission des Communautés Européennes, 1979, 355-389

☞ NIFENECKER H., GIRNI A., LOISEAUX J.M.

Quand les déchets deviennent combustibles
La Recherche, septembre 1997, 301, dossier "Les déchets nucléaires", 75-78

☞ PONCHELET H.

Les mécanismes du grand chamboulement
Le Point, août 1997, 1298, 52-53

☞ RAMSAY W.

Unpaid costs of electrical energy
The John Hopkins University Press, 1979, 180 p.

☞ REINBERG A., ANDALAUER P., LEVI F.

Chronobiologie et travail posté
In Encyclopédie Médico-Chirurgicale: Toxicologie, pathologie professionnelle
Éditions scientifiques et médicales Elsevier, 1996, 3, réf. 16785A10, 5 p.

☞ SCHAPIRA J.P.

Le coeur du problème: Les déchets à vie longue
La Recherche, septembre 1997, 301, dossier "Les déchets nucléaires", 65-69

☞ SEAMAN M.A.

International experience in the assessment of risks due to oil and gas production and chemicals manufacture
In Assessing and managing health and environmental risks from energy and other complex industrial systems
Agence Internationale pour l'Énergie Atomique, 1988, 73-94

Nota Bene

La Faculté de Pharmacie de Lyon n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les thèses; ces opinions sont considérées comme propres à leurs auteurs.

BERTRAND (Sylvain) - Étude comparée pour la Santé de la production d'énergie nucléaire et thermique (charbon, fuel, gaz). - 60 f.
th.D. : Pharm. : Lyon : 1997 ; 103

RESUME :

La thèse commence par quelques explications techniques sur les systèmes de production d'énergie thermique (charbon, fuel, gaz) et nucléaire. Par la suite, sont abordées les conséquences pour la santé du Public et du personnel exploitant ces systèmes de production d'énergie, et les répercussions sur l'environnement. Enfin, après un travail de synthèse bibliographique, l'auteur essaye d'établir une comparaison entre les deux.

Les avis sont très partagés, chaque système ayant ses avantages et ses inconvénients. Cependant, la production d'énergie nucléaire semble la moins néfaste à long terme pour la santé et pour l'environnement.

MOTS CLES :

Énergie nucléaire
Énergie thermique
Santé

JURY :

Président : Pr. P. CHAMBON
Membres : Dr. Ch. TROUILLET
M. J.B. RICARD

DATE DE SOUTENANCE :

Lundi 15 décembre 1997

ADRESSE DE L'AUTEUR :

108 bis, Avenue Lacassagne
69003 LYON