



*Master 1^{ère} année
Sciences de
l'Environnement*



RAPPORT DE STAGE

Bilan des rejets radioactifs gazeux de Valduc (hors tritium)



(Vue aérienne du CEA de Valduc)

**- Angélique MOROT -
Promotion 2004 - 2005**

Réalisé sous la direction de Catherine SAUT, chargée de mission de la SEIVA, et de François CLINARD, maître de conférences à l'université de Bourgogne.

Remerciements

En tout premier lieu, je tiens à remercier Eric FINOT, président de la SEIVA, et Catherine SAUT, chargée de mission de la SEIVA, qui m'ont proposé un stage de cinq semaines au sein de cette association.

J'exprime ma plus profonde gratitude une nouvelle fois à Catherine SAUT, ainsi qu'à mon tuteur, François CLINARD, pour l'aide précieuse qu'ils ont pu m'apporter au cours de mon stage et pour la rédaction du présent rapport.

Je remercie également le Service de Protection contre les Rayonnements du Centre de Valduc pour leur accueil, en particulier Josyane CARRELET et David PIERRAT pour le temps qu'ils nous ont consacré.

Je n'oublie pas non plus Josie DUPAQUIER, secrétaire, et Ivan LITVINENKO-MOREL, étudiant stagiaire en 2^{ème} année à l'ESIREM, qui, grâce à leur gentillesse et leur amabilité, ont contribué au bon déroulement de mon stage.

Sommaire

<u>INTRODUCTION</u> -----	1
<u>I LA SEIVA</u> -----	2
<u>A Organisation</u> -----	2
<u>B Les commissions locales d'information</u> -----	2
<u>C Les objectifs</u> -----	2
<u>II LE CEA DE VALDUC</u> -----	3
<u>A Généralités</u> -----	3
<u>B Aspect environnemental</u> -----	4
<u>III LA RADIOACTIVITE</u> -----	4
<u>A Généralités</u> -----	4
<u>B Les unités de mesure</u> -----	5
<u>IV LES REJETS RADIOACTIFS GAZEUX</u> -----	7
<u>A Les normes et les autorisations de rejets</u> -----	7
1. <u>Etablissement des normes</u> -----	7
2. <u>Normes</u> -----	7
3. <u>Autorisations de Valduc</u> -----	8
<u>B Les éléments rejetés à Valduc</u> -----	8
1. <u>Les gaz rares</u> -----	8
2. <u>Les halogènes et aérosols</u> -----	8
3. <u>Les aérosols alpha</u> -----	8
<u>C Evolution des rejets depuis 1992</u> -----	9
<u>V LES EFFETS ENVIRONNEMENTAUX DES ELEMENTS REJETES</u> -----	10
<u>A Répartition de la radioactivité</u> -----	10
<u>B Transfert le long de la chaîne alimentaire</u> -----	11
1. <u>Transfert sol-plante</u> -----	11
2. <u>Transfert chez l'animal</u> -----	12

<u>VI LES EFFETS SANITAIRES DES ELEMENTS REJETES</u>	13
<u>A L'exposition</u>	13
<u>B Effets généraux</u>	14
1. <u>Risque cancérogène</u>	14
2. <u>Effets tératogènes</u>	15
3. <u>Effets héréditaires</u>	16
4. <u>Détérioration de l'ADN</u>	16
<u>C. La mort cellulaire et les lésions tissulaires</u>	16
1. <u>Les effets sur les gonades</u>	18
2. <u>Les effets sur l'œil</u>	18
3. <u>Les effets sur le rein</u>	18
4. <u>Les effets sur les os</u>	18
5. <u>Les effets sur la peau</u>	18
<u>D Eléments pris en compte</u>	19
1. <u>La période</u>	19
2. <u>Les groupes de risque</u>	19
<u>E Spécificités des radioéléments rejetés à Valduc</u>	20
1. <u>Les gaz rares : le krypton et le xénon</u>	20
2. <u>Les halogènes : l'iode</u>	20
3. <u>Les aérosols a</u>	21
a. <u>L'uranium</u>	21
b. <u>Le plutonium</u>	22
c. <u>L'américium</u>	24
<u>CONCLUSION</u>	25

Récapitulatif des figures et des tableaux

<u>FIGURE 1 : L'IMPLANTATION DES CEA EN FRANCE (HORS REGION PARISIENNE)</u>	3
<u>FIGURE 2 : LES DIFFERENTS TYPES DE RAYONNEMENTS</u>	5
<u>FIGURE 3 : EVOLUTION DES REJETS DE GAZ RARES</u>	9
<u>FIGURE 4 : EVOLUTION DES REJETS D'HALOGENES ET AEROSOLS</u>	9
<u>FIGURE 5 : EVOLUTION DES REJETS D'AEROSOLS A</u>	9
<u>FIGURE 6 : LES COMPOSANTES DE L'EXPOSITION HUMAINE</u>	11
<u>FIGURE 7 : TRANSFERT DES RADIONUCLEIDES A L'HOMME</u>	12
<u>FIGURE 8 : EXPOSITION EXTERNE ET INTERNE A LA RADIOACTIVITE</u>	13
<u>FIGURE 9 : EFFETS LIES A UNE IRRADIATION HOMOGENE</u>	14
<u>FIGURE 10 : EFFETS D'UNE IRRADIATION D'UNE CELLULE</u>	14
<u>FIGURE 11 : CARACTERISTIQUES DES EFFETS DETERMINISTES ET STOCHASTIQUES</u>	15
<u>FIGURE 12 : TRANSFERT DU PLUTONIUM LE LONG DE LA CHAINE ALIMENTAIRE</u>	23
<u>TABLEAU 1 : LES UNITES UTILISEES EN RADIOACTIVITE</u>	5
<u>TABLEAU 2 : W_R POUR DIFFERENTS TYPES DE RAYONNEMENTS</u>	6
<u>TABLEAU 3 : W_T POUR DIFFERENTS TISSUS OU ORGANES</u>	6
<u>TABLEAU 4 : EVOLUTION DES NORMES DE RADIOPROTECTION DE LA CIPR</u>	7
<u>TABLEAU 5 : ABSORPTION DIGESTIVE PAR L'ANIMAL DE QUELQUES RADIONUCLEIDES</u>	12
<u>TABLEAU 6 : EFFETS D'UNE EXPOSITION DURANT UNE GROSSESSE</u>	15
<u>TABLEAU 7 : NOMBRE DE LESIONS RADIOINDUITES DANS LA MOLECULE D'ADN</u>	16
<u>TABLEAU 8 : EFFETS DETERMINISTES DES RAYONNEMENTS IONISANTS</u>	17
<u>TABLEAU 9 : DOSE SEUIL ET DELAI D'APPARITION DES EFFETS DETERMINISTES POUR LA PEAU</u>	19
<u>TABLEAU 10 : CARACTERISTIQUES DES ISOTOPES DE L'URANIUM</u>	21
<u>TABLEAU 11 : CARACTERISTIQUES DES ISOTOPES DU PLUTONIUM</u>	22
<u>TABLEAU 12 : PERIODE BIOLOGIQUE DU PLUTONIUM DANS DIFFERENTS TISSUS</u>	23
<u>TABLEAU 13 : DISTRIBUTION DE L'AMERICIUM DANS LE CORPS HUMAIN</u>	24

BILAN DES REJETS RADIOACTIFS GAZEUX DE VALDUC (hors tritium)

Résumé

Le CEA de Valduc dispose d'une autorisation pour rejeter des éléments radioactifs gazeux autres que le tritium. Ceux-ci sont classés en trois catégories : les gaz autres que le tritium, les halogènes gazeux et les aérosols, les radioéléments émetteurs alpha. Cette étude n'avait pas pour ambition de réaliser une étude de risques sanitaires autour du site de Valduc, mais plutôt de recenser les différents éléments rejetés et d'évaluer leur potentiel toxique pour l'environnement et pour l'homme.

Dans la première catégorie, on retrouve deux gaz rares, déclinés sous plusieurs isotopes : le krypton 85 et 88 et le xénon 131, 133 et 136. Les gaz rares sont les éléments les plus stables chimiquement et ont un très faible potentiel de contamination de l'être humain. Dans la catégorie halogènes gazeux et aérosols, un seul élément est rejeté : l'iode 131. Celui-ci est dangereux pour la thyroïde avec risque de troubles du métabolisme et de cancer thyroïdien. Chez l'enfant et le fœtus, il induit des retards de croissance et de développement, en particulier du système nerveux. Enfin, en ce qui concerne les radioéléments émetteurs alpha, nous retrouvons les transuraniens suivants : uranium 233 et 238, plutonium 238 à 242, américium 241. Le risque le plus sérieux encouru par ces éléments est l'induction de tumeurs localisées différemment suivant leur organe cible : les os, le foie et les reins pour l'uranium, les poumons, le foie et les os pour le plutonium et le foie et les os pour l'américium.

A Valduc, les quantités d'effluents rejetés sont très largement inférieures aux autorisations, qui sont faites de sorte à limiter les impacts environnementaux et sanitaires.

Mots-clés : CEA Valduc ; Effets sanitaires ; Effluents gazeux ; Normes ; Radioactivité ; Rejets

Introduction

La SEIVA est la **Structure d'Echange et d'Information sur VALduc**. Son objectif est de faire connaître l'impact économique et environnemental des activités du CEA^{1[1]} de Valduc à la population et aux acteurs de l'économie et de l'environnement local, dans la mesure où les sujets abordés ne portent pas sur les éléments confidentiels couverts par son classement INBS^{2[2]}.

Le CEA de Valduc dispose d'une autorisation de rejets d'**effluents*** radioactifs dans l'atmosphère pour différents éléments. Le plus rejeté est le tritium, dont la dispersion et les impacts sont particulièrement étudiés par la SEIVA. Les autres rejets sont classés en trois catégories : les gaz rares, les halogènes et les aérosols, les aérosols alpha. Mais que se cache-t-il derrière ces termes généralistes ? C'est justement ce à quoi la SEIVA m'a demandé de répondre au cours de ces cinq semaines durant lesquelles elle m'a accueillie.

Dans un premier temps, mon travail a consisté à faire un bilan des données existantes sur les rejets radioactifs gazeux autres que le tritium. La deuxième partie de mon stage a consisté en la recherche des impacts que peuvent avoir ces rejets sur l'environnement et la santé publique.

^{1[1]} Commissariat à l'Energie Atomique

^{2[2]} Installation Nucléaire de Base Secrète

I La SEIVA

A Organisation

La SEIVA est une association créée en 1996, à l'initiative du préfet de Côte d'Or (21).

La SEIVA s'agence comme suit :

- ➤ le conseil d'administration, sous la présidence d'Eric Finot, composé d'un vice-président, d'un trésorier, d'un responsable de chacune des quatre commissions thématiques, à savoir, Environnement, Economie, Analyses et Information, et de deux conseillers ;
- ➤ un comité scientifique pluridisciplinaire ;
- ➤ 38 membres réunissant des parlementaires, des conseillers généraux et maires concernés, des personnalités des milieux scientifique, médical et associatif, des représentants du monde agricole et des services de l'Etat concernés ;
- ➤ 6 membres associés qui sont invités permanents de la SEIVA, mais qui ne prennent pas part aux votes.

B Les commissions locales d'information

La SEIVA est assimilée à une CLI^{3[3]}. Les CLI ont été créées auprès des installations nucléaires à l'initiative des conseils généraux à la suite de recommandations d'une circulaire du 1^{er} ministre du 15 décembre 1981 (Circulaire "Mauroy").

Deux missions leurs sont attribuées : d'une part, le suivi de l'impact de ces installations, et d'autre part, l'information des populations.

L'ANCLI^{4[4]} a été créée en 2000 pour trois raisons :

- ➤ constituer d'un réseau d'échange et d'information pour les CLI ;
- ➤ être un centre de ressource ;
- ➤ être un interlocuteur des pouvoirs publics ainsi que des organismes nationaux et internationaux dans le domaine du nucléaire.

C Les objectifs

La SEIVA agit sur trois grands axes :

- ➤ mieux connaître l'impact sanitaire et environnemental dû aux activités du CEA de Valduc. Pour cela, la SEIVA met en œuvre chaque année une campagne d'analyse de la radioactivité aux alentours de Valduc : elle recherche et assure un suivi du marquage radioactif des eaux superficielles et souterraines, des eaux de consommation, des aliments, des lichens... ;
- ➤ mieux connaître l'impact des activités du CEA sur l'économie locale. La SEIVA entretient un dialogue permanent avec le CEA, par le biais de sa commission

^{3[3]} Commission Locale d'Information

^{4[4]} Association Nationale des Commissions Locales d'Information

Economie, afin de quantifier cet impact mais aussi de susciter des contacts entre les entreprises locales et le centre de Valduc ;

- ➤ aider à comprendre, apporter des connaissances. Le secret défense qui entoure Valduc a conduit à une certaine opacité vis-à-vis de la population et des acteurs locaux. La SEIVA aide à améliorer la transparence quant aux impacts passés, présents et futurs du centre de Valduc. Pour cela, elle organise des conférences sur la radioactivité, des rencontres et des visites, et publie un périodique "Savoir et Comprendre" qui est distribué aux habitants des communes avoisinant le centre de Valduc.

II Le CEA de Valduc

A Généralités



Figure Erreur ! Signet non défini. : l'implantation des CEA en France (hors région parisienne) [33]

Le centre de Valduc est l'un des dix établissements du CEA. Le CEA est un organisme de recherche sur le nucléaire, créé en 1945 par le général de Gaulle. Le Centre de Valduc a été ouvert en 1957 en plein cœur de la Bourgogne, à 45 km au nord-ouest de Dijon. Il dépend de la DAM^{5[5]} du CEA. A Valduc sont fabriquées et recyclées les têtes nucléaires de la force de dissuasion nucléaire de la France. Le centre de Valduc a trois missions principales :

- ➤ recherches amont et développements technologiques sur les matériaux nucléaires et sur les objets d'expérimentation nécessaires au programme de simulation des essais nucléaires ;
- ➤ réalisation et maintien en condition opérationnelle de la partie nucléaire des armes de la force de dissuasion, démantèlement d'armes anciennes retirées du service ;
- ➤ gestion des matières nucléaires liées à ses activités [6].

Pour remplir ces missions, le CEA de Valduc embauche 970 employés, sans compter ceux des entreprises sous-traitantes.

La Bourgogne est la première région française en terme d'emplois liés à l'industrie nucléaire (environ 7000 salariés).

^{5[5]} Direction des Applications Militaires

B Aspect environnemental

La protection du milieu naturel au voisinage du centre est une préoccupation majeure de la politique de sécurité de Valduc. Le contrôle permanent des rejets et la surveillance de l'environnement sont deux axes de cette politique. Les rejets restent toujours largement inférieurs aux limites fixées par les arrêtés ministériels.

La surveillance de l'environnement est assurée sous contrôle de l'IRSN^[6] qui est placé sous la tutelle des ministères chargés de l'environnement, de l'industrie, de la recherche, de la santé et de la défense. Cette surveillance comprend des prélèvements atmosphériques, des prélèvements d'eau, de lait, des végétaux, à l'intérieur du centre, mais aussi à l'extérieur. Plus de 10 000 analyses sont ainsi effectuées chaque année. Les bilans sont communiqués aux collectivités locales et sont consultables par le public.

En ce qui concerne les effluents gazeux, l'arrêté ministériel du 3 mai 1995 relatif à l'autorisation de rejets d'effluents radioactifs gazeux par le centre d'études de Valduc prévoit des contrôles stricts pour chaque cheminée. Pour les gaz autres que le tritium, une mesure continue de l'activité volumique doit être effectuée et les radioéléments significatifs doivent être déterminés. Pour les halogènes, un prélèvement continu sur adsorbant spécifique doit être réalisée, l'activité gamma totale, ainsi que l'activité des radioéléments significatifs (dont ¹³¹I obligatoire) doit être mesurée. Quant aux aérosols, ils doivent faire l'objet d'un prélèvement continu sur filtre avec une mesure des activités alpha et bêta totales [2].

III La radioactivité

A Généralités

Dans la nature, la plupart des noyaux d'atomes sont stables. Cependant certains éléments ont des noyaux instables, ce qui est dû à un excès soit de protons, soit de neutrons, soit des deux. Ceux-ci peuvent se scinder spontanément en plusieurs parties. Ils émettent alors des rayonnements dits ionisants et cette émission est appelée radioactivité. Il existe 3 types de rayonnements :

- ➤ les rayons alpha (α) : ce sont des noyaux d'hélium (2 protons et 2 neutrons). Ils sont très dangereux pour la matière vivante mais peu pénétrants ;
- ➤ les rayons bêta (β) : ce sont des électrons. Un neutron se scinde en un électron et un proton. L'électron émis est alors appelé rayon β . Ces rayonnements sont moins ionisants que les rayons α mais sont plus pénétrants ;
- ➤ les rayons gamma (γ) : ce sont des rayonnements électromagnétiques comme la lumière et les rayons ultraviolets. Ils ont une faible longueur d'onde, une très forte énergie et un grand pouvoir pénétrant.

^[6] Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

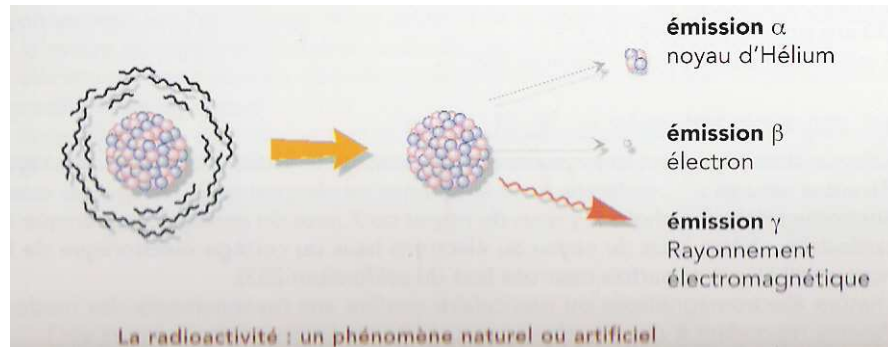


Figure Erreur ! Signet non défini. : les différents types de rayonnements [9]

B Les unités de mesure

Tableau Erreur ! Signet non défini. : les unités utilisées en radioactivité

Grandeurs	Unités	Définitions
Activité	becquerel (Bq) ----- curie (Ci)	Mesure du nombre de désintégrations par seconde au sein d'une matière radioactive 1 Ci = 3,7.10 ¹⁰ Bq
Dose absorbée	gray (Gy)	Mesure de l'énergie reçue par la matière irradiée par unité de masse
Dose équivalente	sievert (Sv)	Calcul du dégât biologique sur les tissus vivants irradiés (pondération en fonction du type de rayonnement) Point de repère : 2,4 mSv est la dose efficace de la radioactivité naturelle (moyenne annuelle mondiale)
Débit de dose absorbée	gray par heure (Gy/h)	Quantité d'énergie reçue par la matière irradiée par unité de masse et par unité de temps
Débit d'équivalent de dose	sievert par heure (Sv/h)	Dégât biologique subi par un tissu vivant irradié par unité de temps

Les rayonnements provoquent des perturbations sur la matière inerte et des dégâts biologiques lorsqu'ils s'exercent sur la matière vivante. Ces effets varient en fonction de la quantité d'énergie cédée lors du choc avec la matière vivante et de la manière dont cette énergie est cédée. Le gray est l'unité de mesure de l'irradiation d'un corps vivant. Cette dose est pondérée par la nocivité propre au rayonnement qui a provoqué l'irradiation : c'est la notion de dose équivalente qui s'exprime alors en sieverts. Ce calcul est très utilisé en radioprotection car il permet d'exprimer de façon comparable les effets des différents rayonnements ionisants.

$$H_T = D \cdot W_R \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} H = \text{dose équivalente (Sv)} \\ D = \text{dose absorbée (Gy)} \\ W_R = \text{facteur de pondération radiologique} \end{array}$$

Tableau Erreur ! Signet non défini. : W_R pour différents types de rayonnements

Types de rayonnements et énergies		W_R
X, γ (toutes énergies)		1
β^+ , β^- et électrons		1
Neutrons	< 10 keV	5
	De 10 à 100 MeV	10
	De 100 keV à 2MeV	20
	De 2 MeV à 20 MeV	10
	> 2 MeV	5
Protons	> 2 MeV	5
α , fragments de fission, noyaux lourds		20

Cependant, le risque biologique n'est pas uniforme pour l'ensemble de l'organisme. Il dépend de la nature de l'organe irradié et de sa radiosensibilité. Pour en tenir compte, les doses équivalentes sont pondérées en fonction des différents tissus et organes, ce qui permet de déterminer des doses dites "efficaces", exprimées également en sieverts.

$$E = \sum (W_T \cdot H_T) \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} E = \text{dose efficace (Sv)} \\ W_T = \text{facteur de pondération tissulaire} \\ H_T = \text{dose équivalente reçue au niveau} \\ \text{d'un organe ou d'un tissu exposé} \end{array}$$

Tableau Erreur ! Signet non défini. : W_T pour différents tissus ou organes

Tissus ou organe	W_T
Gonades	0,2
Moelle osseuse	0,12
Côlon	0,12
Poumons	0,12
Estomac	0,12
Vessie	0,05
Sein	0,05
Foie	0,05
Œsophage	0,05
Thyroïde	0,05
Peau	0,01
Surface des os	0,01
Autres	0,05

IV Les rejets radioactifs gazeux

A Les normes et les autorisations de rejets

1. Etablissement des normes

L'établissement de normes est basé sur le principe de précaution selon lequel "l'absence de certitude, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement, à un coût économiquement acceptable" [20].

L'établissement des normes se fonde d'une part sur les études menées à travers le monde entier, relatives à l'action des rayonnements sur les organismes vivants. Il s'appuie d'autre part sur les études épidémiologiques réalisées à Hiroshima et Nagasaki, en faisant une extrapolation des résultats. A la lumière de ces analyses, la **CIPR**^{*7[7]} émet des avis et des recommandations en matière de radioprotection, qui sont ensuite plus ou moins rapidement transcrites dans la réglementation propre à chaque état.

Au niveau européen, la Commission Européenne, par application du traité **EURATOM**^{*8[8]}, retransmet ces avis dans ses propres normes et directives. Elles sont à la base de la réglementation française relative aux principes généraux de protection contre les rayonnements ionisants.

2. Normes

La Directive 96/29/EURATOM du 13 mai 1996 fixe les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants. Elle prend en compte les recommandations de la CIPR 60, qui fixe de nouvelles limites : 1 mSv/an pour le public, et 100 mSv sur cinq ans pour les travailleurs, sans jamais dépasser 50 mSv sur une année. En tant que directive, elle impose des obligations de résultat à chaque état membre. En ces termes, la France a transposé cette directive en droit interne dans le décret n°2002-460 du 4 avril 2002 relatif à la protection générale des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants.

Tableau Erreur ! Signet non défini. : évolution des normes de radioprotection de la CIPR

Pour les travailleurs	Pour la population
1934 : 460 mSv/an	1959 : 5 mSv/an
1950 : 150 mSv/an	1985 : 1 mSv/an
1956 : 50 mSv/an	
1990 : 20 mSv/an	

^{7[7]} Commission Internationale de Protection Radiologique

^{8[8]} communauté Européenne de l'énergie ATOMique

3. Autorisations de Valduc

Les rejets autorisés sont définis dans l'arrêté du 3 mai 1995 relatif à l'autorisation de rejet d'effluents radioactifs gazeux par le centre d'étude de Valduc.

Rejets maxima annuels autorisés :

- ➤ 40.10^{12} Bq (1.10^3 Ci) pour les gaz autres que le tritium ;
- ➤ 750.10^6 Bq (20.10^{-3} Ci) pour les halogènes gazeux et les aérosols gazeux ;
- ➤ 75.10^6 Bq (50.10^{-3} Ci) pour les radioéléments émetteurs α .

B Les éléments rejetés à Valduc

1. Les gaz rares

Les gaz rares correspondent à la dernière colonne du tableau périodique des éléments. Ce sont les éléments les plus stables de la matière. Chimiquement inerte, ils ne réagissent pas dans l'air avec d'autres éléments et sont très peu solubles dans l'eau.

Le centre de Valduc rejette spécifiquement du krypton (85 et 88) et du xénon (131, 133 et 136).

2. Les halogènes et aérosols

Les halogènes correspondent à l'avant-dernière colonne du tableau périodique des éléments. Le centre de Valduc rejette exclusivement de l'iode 131.

D'un terme général, l'appellation aérosol désigne des particules liquides très fines qui se dispersent dans un gaz (air ou oxygène). Au niveau de l'autorisation, cette dénomination rassemble plus précisément les émetteurs α (hors tritium). A Valduc, aucun aérosol n'est rejeté.

3. Les aérosols alpha

Dans cette catégorie sont regroupés les émetteurs α suivants :

- ➤ Uranium 233 et 238
- ➤ Plutonium 238, 239, 240, 241 et 242
- ➤ Américium 241

C Evolution des rejets depuis 1992

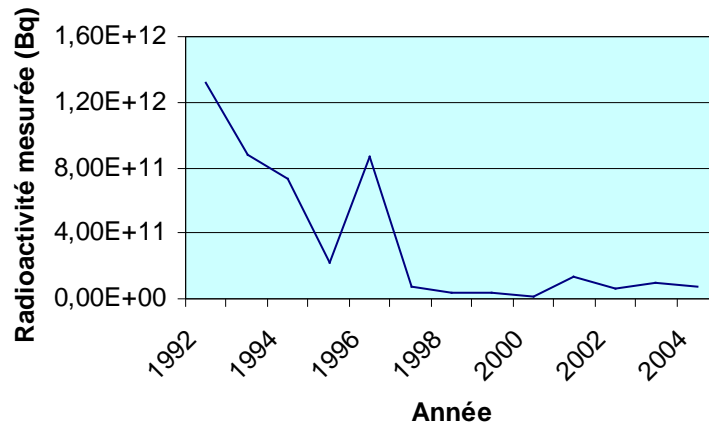


Figure Erreur ! Signet non défini. : évolution des rejets de gaz rares (source CEA Valduc)

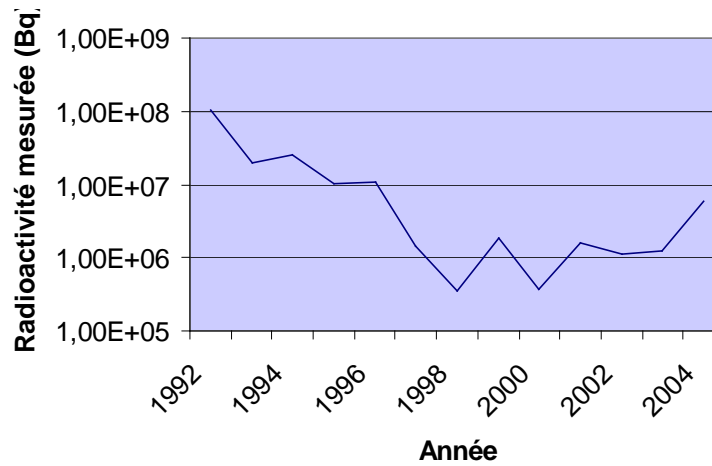


Figure Erreur ! Signet non défini. : évolution des rejets d'halogènes et aérosols (source CEA Valduc)

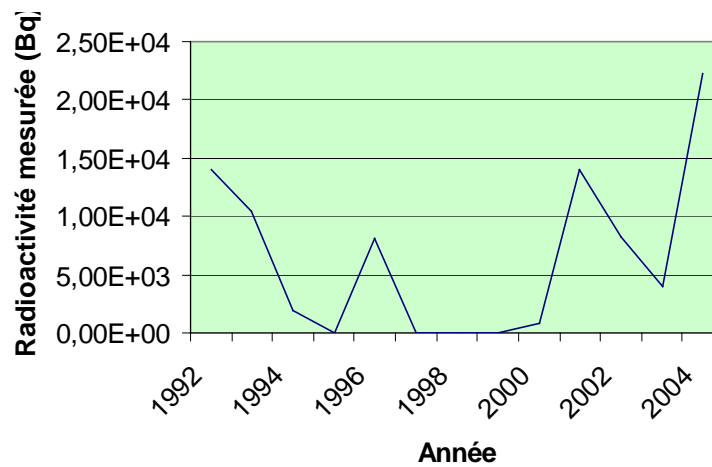


Figure Erreur ! Signet non défini. : évolution des rejets d'aérosols a (source CEA Valduc)

Le centre de Valduc rejette environ 80 000 m³/an d'effluents gazeux, ce qui correspond à 300 m³/jour ouvrable. Ces rejets sont imputables aux activités de maintenance des armes et aux réacteurs expérimentaux présents sur le site.

A partir de 1992, la tendance des rejets est à la baisse. Cette diminution résulte essentiellement de l'effort constant porté à la réduction de l'impact de ces installations sur l'environnement, conformément au concept ALARA : As Low As Reasonably Achievable ("aussi bas que raisonnablement possible") [3].

En ce qui concerne les rejets gazeux, les réseaux de ventilation des installations sont équipés de filtres de Très Haute Efficacité (THE) capables de retenir la plupart des aérosols radioactifs. Des pièges à iode (filtres à charbon actif) équipent en outre les exutoires où pourrait se dégager de l'iode radioactif. Les cheminées sont équipées de dispositifs de prélèvement en continu permettant l'analyse et l'évaluation des rejets. Des systèmes de détection par capteurs permettent d'assurer une surveillance permanente de ceux-ci.

Tableau Erreur ! Signet non défini. : **Rejets d'effluents gazeux par le centre de Valduc en 2004 (source CEA)**

2004	Autorisé	Rejeté	Pourcentage
Gaz rares	4,00E+13	7,26E+10	0,18
Halogènes et aérosols	7,50E+08	5,91E+06	0,79
Aérosols alpha	7,50E+08	2,23E+04	0,03

Tous ces équipements font que les rejets sont inférieurs à 1 % des autorisations. Leur objectif à l'heure actuelle n'est plus de diminuer la quantité d'effluents gazeux, mais de réduire au maximum les risques d'accidents qui auraient un effet plus dangereux que ces rejets.

Depuis 2001, les rejets en halogènes et en autres gaz ont repris avec la remise en exploitation du réacteur Silène (Source d'Irradiation à Libre Evolution NEutronique) pour les études de criticité de l'IRSN.

Le classement "secret défense" dont fait l'objet le CEA de Valduc rend difficile l'obtention d'informations précises sur les raisons des variations des rejets.

V Les effets environnementaux des éléments rejetés

A Répartition de la radioactivité

85% de la radioactivité est naturelle. L'estimation est faite qu'en moyenne, chaque être humain est soumis à une dose équivalente de 2,4 mSv en moyenne.

Les **radionucléides*** se trouvent de façon ubiquiste dans tous les compartiments de l'environnement. Quelle que soit leur forme physique, ils sont entraînés dans les mouvements de l'air et de l'eau autour de la planète, sous forme de gaz et d'aérosols dans la circulation générale de l'atmosphère, et sous forme d'espèces dissoutes, particulaires et colloïdales dans

l'écoulement des nappes souterraines, des rivières et dans la circulation océanique. Cette circulation tend à homogénéiser les radionucléides et les dilue. Cependant, les radionucléides sont aussi soumis, depuis l'atmosphère, à des dépôts sur le sol et, dans l'hydrosphère, à la précipitation ou à la sédimentation. Ils peuvent donc s'accumuler localement.

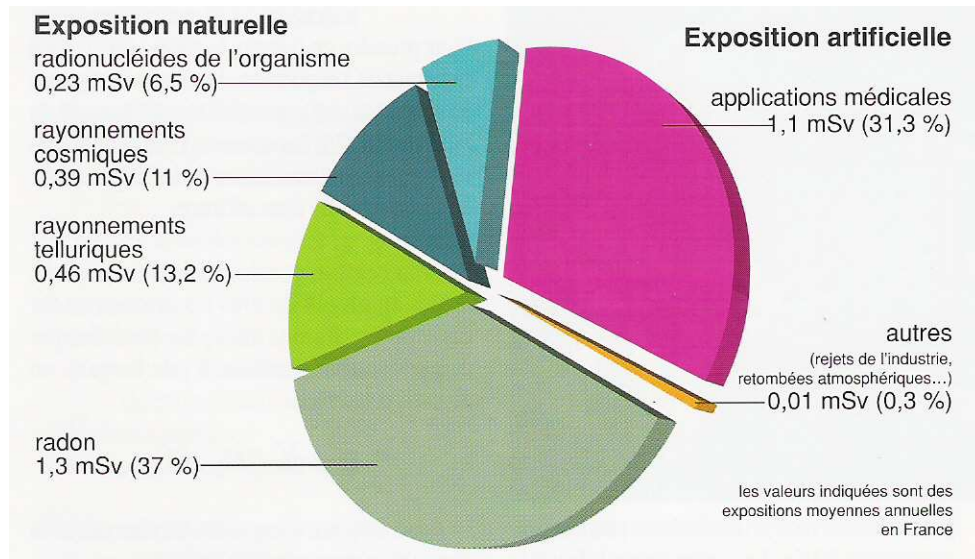


Figure Erreur ! Signet non défini. : les composantes de l'exposition humaine [25]

L'atmosphère représente le premier milieu à travers lequel migrent les gaz et les aérosols. Emis par les cheminées des installations, les radionucléides présents sous ces formes physiques se répartissent dans l'air sous l'effet combiné de l'**advection*** par le vent et de la dispersion **turbulente*** [21]. On assiste donc à un effet de dilution. Si les particules sont plus lourdes que l'air, elles retombent d'autant plus près du point d'émission que leur densité est élevée. En revanche, les gaz et les aérosols plus légers se déplacent au rythme des vents [4].

B Transfert le long de la chaîne alimentaire

1. Transfert sol-plante

Le transfert sol-plante constitue un maillon important dans la contamination de la chaîne alimentaire de l'homme par des polluants, qu'ils soient radioactifs ou non. Ce transfert est déterminé par de nombreux facteurs, dépendant de la nature de l'apport du polluant, de la composition du sol et de la physiologie des espèces végétales.

En général, les radionucléides sont présents dans des concentrations très faibles et, par conséquent, de faible toxicité, une exception notable étant l'uranium. Il y a donc, pour les radionucléides, moins de pression de sélection favorisant une discrimination biologique pour des polluants chimiques toxiques. Pour l'uranium, sa concentration dans des sols est insuffisante pour que les végétaux développent un système leur permettant d'en limiter l'assimilation [29].

Les végétaux peuvent également être contaminés par dépôt direct. En effet certains radionucléides, tel que le césium, ont la capacité de franchir la cuticule de la feuille [15].

2. Transfert chez l'animal

La contamination des chaînes trophiques par des radionucléides libérés dans l'environnement constitue une composante majeure de l'exposition humaine aux rayonnements ionisants. Le transfert de ces radionucléides dans les produits d'origine animale peut être très rapide (2 à 12 h). Le degré d'exposition des animaux dépend des propriétés métaboliques de l'élément considéré, du régime alimentaire de l'animal, des techniques agricoles et zootechniques locales.

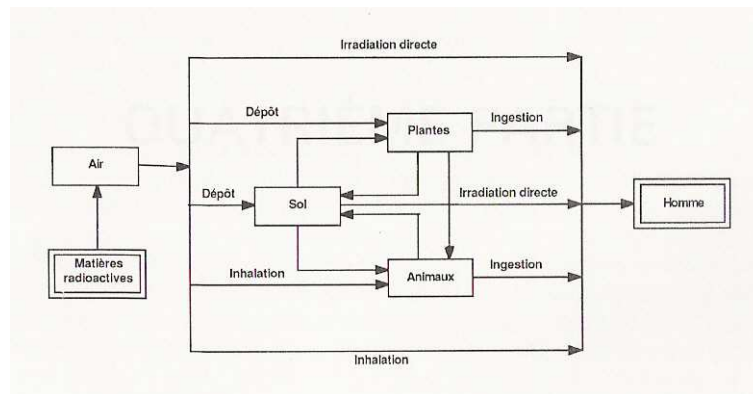


Figure Erreur ! Signet non défini. : transfert des radionucléides à l'Homme [4]

La voie de transfert prédominante est la consommation d'aliments, d'eau ou de terre contaminés. Pour la plupart des éléments, l'absorption transcutanée et l'absorption par inhalation sont peu fréquentes.

Tableau Erreur ! Signet non défini. : absorption digestive par l'animal de quelques radionucléides [32]

<i>En % de la quantité ingérée</i>	<i>Radionucléides</i>
70 – 100 %	Iode, césium, rubidium
20 – 70 %	Tellure, radium, strontium
1 – 20 %	Rhuthénium, argent, antimoine
< 1%	Actinides, zirconium, niobium, cérium

Il existe donc 3 contaminants majeurs de la chaîne alimentaire : ce sont l'iode (^{131}I et ^{133}I), le strontium (^{89}Sr et ^{90}Sr) et le césium (^{134}Cs et ^{137}Cs). Ils sont très facilement absorbés et métabolisés car ils ont un rôle biologique (iode) ou bien suivent le transit métabolique d'un élément biogène, c'est-à-dire indispensable à la vie (calcium/strontium, potassium/césium). D'autres radionucléides produits par l'industrie nucléaire (actinides) peuvent être retrouvés dans les écosystèmes agricoles, mais leur faible assimilation par les êtres vivants limite leur impact sanitaire [32].

VI Les effets sanitaires des éléments rejetés

A L'exposition

On distingue plusieurs types d'exposition :

- ➤ exposition externe résultant de sources situées en dehors de l'organisme ;
- ➤ exposition interne résultant de sources situées dans l'organisme (après inhalation ou ingestion de substances radioactives) ;

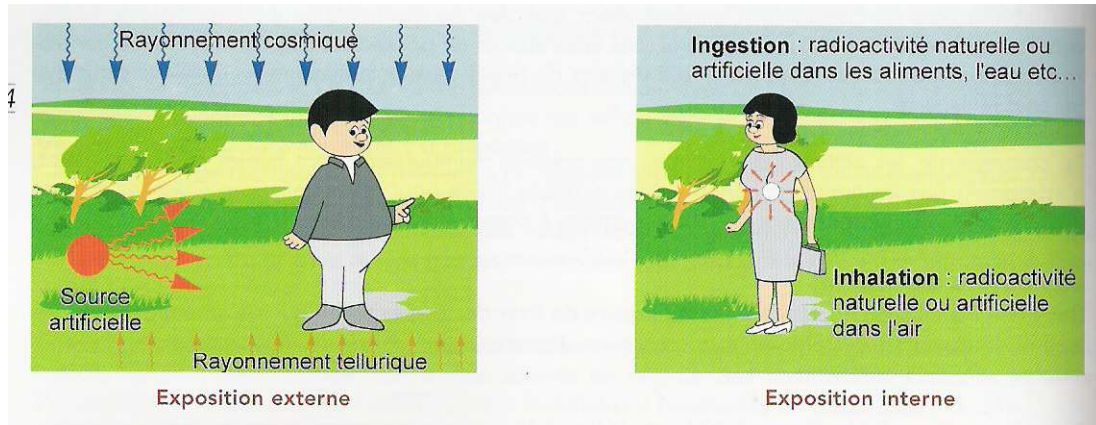


Figure Erreur ! Signet non défini. : exposition externe et interne à la radioactivité [9]

- ➤ exposition totale : somme des expositions interne et externe ;
- ➤ exposition globale : exposition du corps entier considéré comme homogène ;
- ➤ exposition partielle : exposition portant essentiellement sur une partie de l'organisme ou sur un ou plusieurs organes ou tissus [11].

Les radionucléides peuvent pénétrer dans l'organisme par différentes voies :

- ➤ la voie respiratoire : une fraction des radionucléides est alors rejetée lors de l'expiration. Une autre fraction peut, selon les caractéristiques physico-chimiques du composé, soit se retrouver dans le sang, soit adhérer au tissu pulmonaire. Le reste se dépose dans les voies respiratoires supérieures puis est entraîné dans l'appareil digestif ;
- ➤ la voie digestive : les composés insolubles sont éliminés naturellement et n'entraîne qu'une radiotoxicité mineure. Les radionucléides ingérés sous forme soluble traversent la barrière intestinale, passent dans le sang et peuvent être fixés par un organe cible ;
- ➤ la voie transcutanée se fait directement par blessure : le radionucléide se dépose dans les tissus environnant la plaie et se trouve en partie entraîné par le sang ;
- ➤ la voie percutanée : la pénétration à travers une peau saine est possible pour certains radionucléides (tritium sous forme d'eau tritiée par exemple) [14].

B Effets généraux

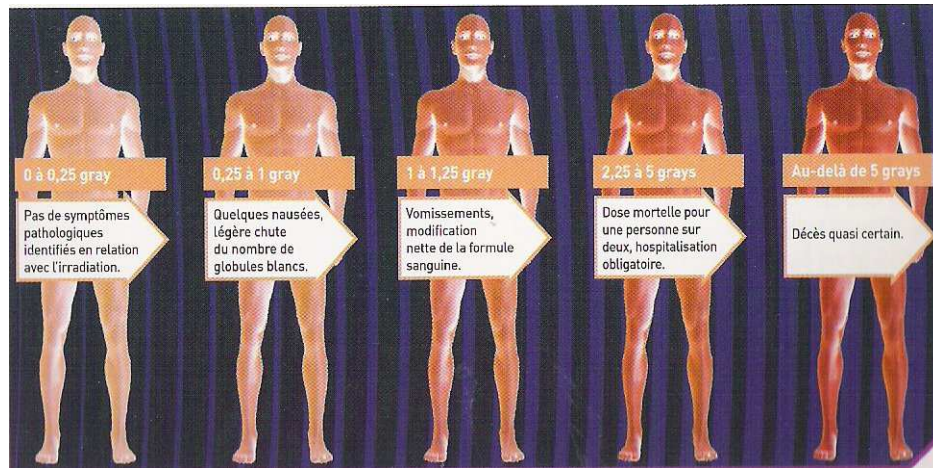


Figure Erreur ! Signet non défini. : effets liés à une irradiation homogène [7]

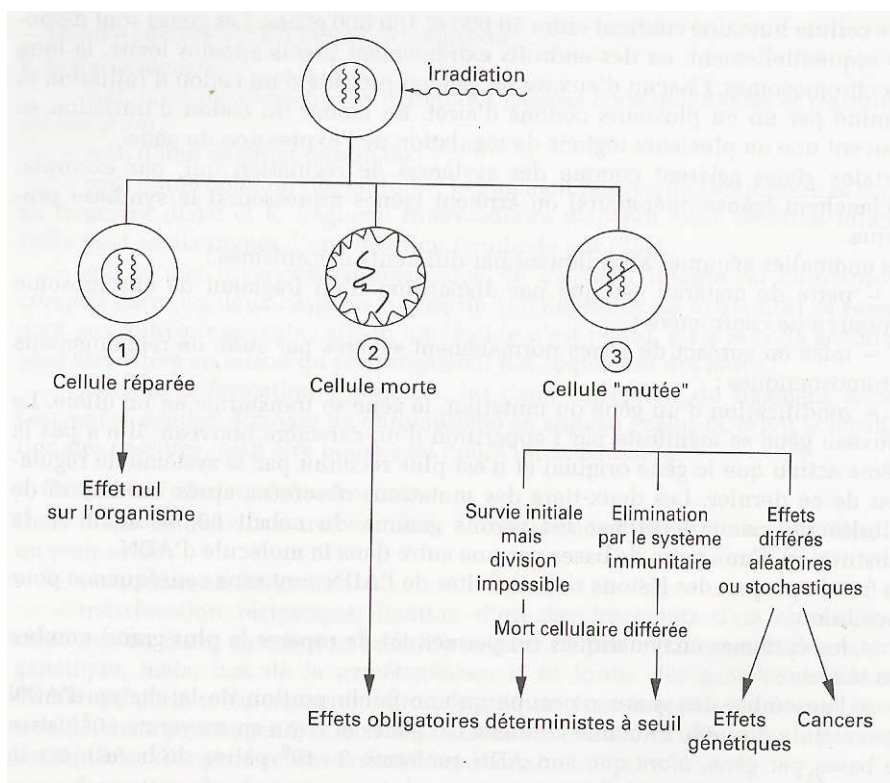


Figure Erreur ! Signet non défini. : effets d'une irradiation d'une cellule [14]

1. Risque cancérigène

Ce risque, avec les risques génétiques, fait partie des effets dits "stochastiques". Quand la dose croît, leur fréquence augmente, mais en l'absence d'autres facteurs, leur gravité reste la même, ce qui les différencie des effets déterministes où l'augmentation de la dose se traduit par une intensification de l'effet biologique. Les effets stochastiques se manifestent chez quelques-uns des individus exposés, toujours tardivement, plusieurs années ou plusieurs dizaines d'années après l'irradiation voire dans le cas de certains effets génétiques, dans la descendance des individus exposés. Ils sont non spécifiques : on ne connaît à l'heure actuelle aucun moyen biologique de déterminer l'origine radioinduite ou spontanée d'un cancer ou d'une anomalie génétique.

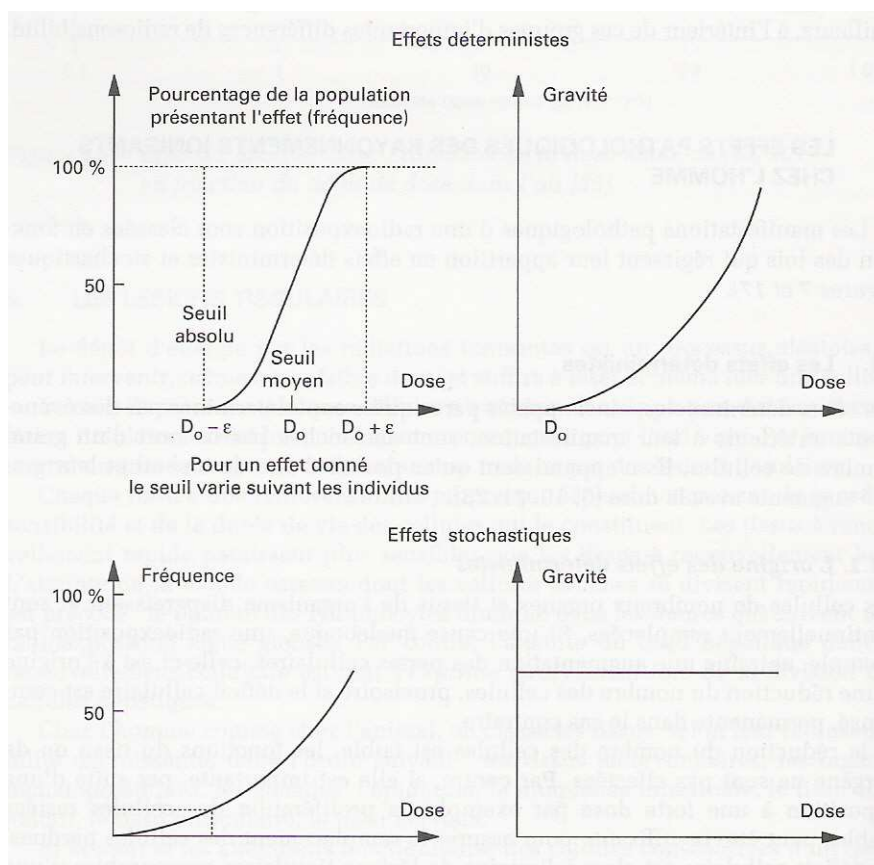


Figure Erreur ! Signet non défini. : caractéristiques des effets déterministes et stochastiques [14]

La période de latence d'un cancer radioinduit, c'est-à-dire le délai entre l'exposition aux rayonnements ionisants et l'apparition d'un cancer, est longue et variable selon le type de cancer et l'âge du patient au moment de l'exposition. Elle est dans tous les cas difficile à estimer précisément. Cette période est en moyenne de 8 ans pour les leucémies et deux à trois fois plus longue pour nombre de tumeurs solides, telles que les cancers du sein et des poumons [25].

La CIPR considère qu'une relation dose-effet linéaire sans seuil constitue la représentation la plus crédible de l'induction des cancers radioinduits. Elle a estimé que le risque de cancer augmente de 6,5 % par sievert pour la population [30].

2. Effets tératogènes*

Tableau Erreur ! Signet non défini. : effets d'une exposition durant une grossesse

Stade	Période	Effets
Pré-implantation	0 - 8 j	Mort intra-utérine ou développement normal
Organogenèse	9 - 60 j	Mort intra-utérine, malformations et maldéveloppement du système nerveux central
Stade fœtal	60 - 270 j	Malformations du système nerveux central, retard mental, troubles de la croissance, cancers de l'enfance

Bien que la sensibilité de l'embryon et du fœtus à l'irradiation semble exister durant toute la période de gestation, à des degrés très variables, des études en cours tendent à

confirmer que le dommage principal est le retard mental. On admet généralement que le risque est négligeable pour une dose inférieure à 0,1 Sv et ne pose le problème d'une éventuelle interruption thérapeutique de grossesse qu'à partir de 0,2 Sv [14].

3. Effets héréditaires

Ces effets résultent de lésions sur les chromosomes de la lignée germinale (spermatozoïdes ou ovules), susceptibles d'entraîner des anomalies dans la descendance de l'individu irradié. Ils peuvent apparaître suite à l'irradiation des gonades. Cependant si les effets existent pour des doses faibles, ils sont trop modestes pour qu'on puisse les mettre en évidence, d'autant plus que d'autres facteurs liés à l'environnement et au mode de vie peuvent interférer.

Le risque génétique des rayonnements ionisants apparaît aujourd'hui moins préoccupant qu'on ne le supposait naguère. Certaines études tendent à montrer que la dose doublante, c'est-à-dire celle qui produira autant de mutations que celles survenant spontanément en une génération, est supérieure à 1 Sv [25].

4. Détérioration de l'ADN*

Les rayonnements ionisants sont l'un des agents mutagènes les mieux connus. Plusieurs effets sont envisageables :

- ➤ rupture de chaîne : rupture d'une seule chaîne due à la cassure des liaisons hydrogène (réparable), rupture double chaîne (très grave car il y a perte de l'intégrité structurale de la molécule, mais réparable) ;
- ➤ lésions de bases : distorsions de la molécule d'ADN ;
- ➤ modification des sucres : libération des bases par oxydation et hydrolyse ;
- ➤ modifications structurale de la molécule d'ADN : pontages qui entravent la division cellulaire.

Tableau Erreur ! Signet non défini. : nombre de lésions radioinduites dans la molécule d'ADN [14]

Nature des liaisons	Nombre par gray et par noyau
Rupture double chaîne	40
Rupture simple chaîne	500-1000
Lésions des bases	800-2000
Lésions des sucres	800-1600
Pontage ADN-ADN	30
Pontage ADN-protéine	150

C. La mort cellulaire et les lésions tissulaires

Nous sommes ici dans le domaine des effets déterministes. Ceux-ci sont précoces, ils se manifestent quelques heures à un mois après l'irradiation. Ils sont réversibles si les lésions ne sont pas trop sévères car les cellules demeurées intactes repeuplent peu à peu le tissu lésé. Ils n'apparaissent qu'à partir d'un certain seuil. Au dessous du seuil, la disparition de quelques

cellules n'induit aucune lésion décelable. Au-dessus du seuil, les effets déterministes se manifestent toujours. La valeur du seuil varie selon les individus.

La mort cellulaire résulte de lésions irréparables dans des structures cellulaires vitales, telles que les chromosomes. Elle peut être immédiate pour des doses élevées de l'ordre de plusieurs grays ou différée (mort pendant tentative de division). Elle dépend du type de cellule, de la phase du cycle cellulaire, de l'environnement cellulaire, de la nature du rayonnement et de la distribution de la dose dans le temps.

Si un grand nombre de cellules meurt, cela peut se traduire par des lésions tissulaires. Chaque tissu a une radiosensibilité propre qui dépend notamment de la radiosensibilité et de la durée de vie des cellules qui le constitue. Les tissus à renouvellement rapide paraissent plus sensibles que les tissus à renouvellement lent.

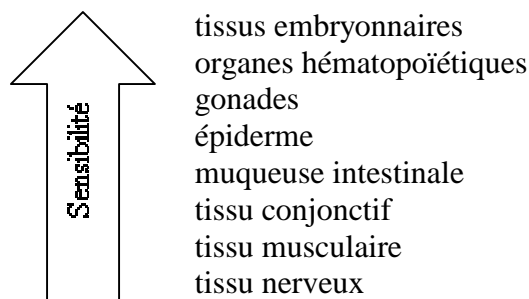


Tableau Erreur ! Signet non défini. : effets déterministes des rayonnements ionisants [14]

Tissu et effet	Seuil		
	Dose équivalente (Sv)		Débit de dose annuel (Sv/an) fractionné ou étalé sur plusieurs années
	Exposition unique brève	Exposition fractionnée ou étalée	
Testicules stérilité transitoire permanente	0,15 3,5 – 6	NA ^{9[9]} NA	0,4 2
Ovaires stérilité	2,5 – 6	6	> 0,2
Cristallin opacités décelables cataracte	0,5 – 2 5	5 > 8	> 0,1 > 0,15
Moelle osseuse altérations de l'hémogramme	0,5	NA	> 0,4

1. Les effets sur les gonades

Les testicules et les ovaires sont parmi les organes les plus radiosensibles. Chez l'homme, on peut observer une stérilité, transitoire pour 0,15 Sv (autrefois employée comme méthode contraceptive), définitive pour 3,5 à 6 Sv, sans diminution des sécrétions hormonales, ni impuissance. La radiosensibilité des ovaires se manifeste pour des doses de

^{9[9]} Non Applicable, le seuil dépend plus du débit de dose que de la dose totale

2,5 à 6 Sv. Les femmes jeunes sont plus sensibles que les femmes âgées. Ainsi une exposition même importante des gonades n'entraîne pas nécessairement des conséquences génétiques puisqu'il y a stérilité temporaire.

2. Les effets sur l'œil

La partie de l'œil la plus radiosensible est le cristallin. L'exposition aux rayonnements ionisants peut provoquer une cataracte. Le délai d'apparition de celle-ci est d'autant plus court que la dose est plus grande, est de l'ordre de 1 à 10 ans. La dose seuil dépend du débit de dose et de la nature des rayonnements. Elle est de 5 à 8 Gy environ, pour les neutrons, plus élevée, d'environ 10 Gy, pour les rayons X et γ .

3. Les effets sur le rein

Le rein est un organe régulateur qui permet de maintenir la stabilité et la salubrité de notre milieu intérieur. C'est un organe radiosensible. Le seuil d'apparition des néphropathies est fixé à 20-25 Gy, selon la séquence dose/fréquence des applications. Dans les mois qui suivent une irradiation, on peut observer l'apparition d'une insuffisance rénale aiguë, marquée par une baisse de la filtration glomérulaire due à la mort des cellules [10].

4. Les effets sur les os

Après une contamination interne, certains éléments radioactifs peuvent être retenus et distribués dans l'organisme de façon analogue au calcium, ce qui traduit leur affinité particulière pour les structures osseuses. Certains métaux alcalino-terreux (radium, strontium), lanthanides ou terres rares (cérium) et actinides (uranium, plutonium) sont par exemples des **ostéotropes*** reconnus. Il est estimé que chez l'homme il existe une dose seuil de 0,8 Gy au-delà de laquelle l'**incidence*** des tumeurs osseuses augmente [26].

5. Les effets sur la peau

La peau est le premier tissu lésé lors d'une exposition externe aux rayonnements ionisants. Après une forte dose (à partir de 15 Gy) une évolution rapide semblable à celle d'une brûlure peut être observée. Des complications tardives sont susceptibles d'apparaître quelques années après l'exposition : atrophie cutanée ou au contraire hypertrophie.

Après une faible dose d'irradiation, il n'y a pas de manifestation clinique. Pourtant des effets sont décelables au niveau cellulaire. Ainsi, une dose de 0,5 Gy est suffisante pour induire une mort cellulaire dans la couche basale de l'épiderme, alors qu'une dose de 50 mGy est capable de modifier le fonctionnement des cellules de la peau [22].

Tableau Erreur ! Signet non défini. : **dose seuil et délai d'apparition des effets déterministes pour la peau**
[14]

Nature des lésions	Dose (Gy)	Délai d'apparition (semaines)
Erythème*	3-5	3
Phlyctènes*	20	4
Nécrose	50	3

D Eléments pris en compte

1. La période

Chaque radioélément est caractérisé par une période physique qui correspond à la durée au bout de laquelle son activité a diminué de moitié. Lorsque celui-ci pénètre dans un corps, des processus physiologiques vont tendre à l'éliminer. On appelle période biologique le temps au bout duquel la moitié de la masse d'une substance a été éliminée de l'organisme par ces processus. Enfin, la période effective représente le temps nécessaire à l'organisme pour éliminer la moitié de la quantité de la substance radioactive, en combinant les phénomènes de décroissance radioactive (période physique) et d'élimination physiologique (période biologique).

$$1/T_{\text{effective}} = 1/T_{\text{physique}} + 1/T_{\text{biologique}}$$

2. Les groupes de risque

Les radionucléides sont répartis en cinq groupes de **radiotoxicité*** :

- ➤ groupe 1 : très forte radiotoxicité SE ≤ 10⁴ Bq
- ➤ groupe 2 : forte radiotoxicité SE = 10⁵ Bq
- ➤ groupe 3 : radiotoxicité modérée SE = 10⁶ Bq
- ➤ groupe 4 : radiotoxicité faible SE = 10⁷ Bq
- ➤ groupe 5 : radiotoxicité très faible SE ≥ 10⁸ Bq

SE est le Seuil d'Exemption. Il a été calculé de telle façon que la dose efficace que pourrait recevoir une personne du public soit de l'ordre de 10 µSv. Ces seuils sont des valeurs à partir desquelles toute intention de détention, de manipulation ou de transport d'un radionucléide doit être déclarée par écrit aux autorités compétentes [9].

Un radioélément est d'autant plus dangereux que sa période effective est longue, qu'il est spécifique et qu'il émet des rayonnements ionisants très énergétiques.

E Spécificités des radioéléments rejetés à Valduc

1. Les gaz rares : le krypton et le xénon

Ils sont classés dans le groupe de risque 1 (très forte radiotoxicité).

Les gaz rares se dispersent dans le milieu atmosphérique et n'ont pas d'interaction avec les autres milieux, notamment le milieu vivant car ils sont biologiquement inertes. Ils n'interfèrent pas avec les tissus vivants (végétaux, animaux, corps humain) [28].

La majorité du krypton largué dans l'atmosphère y reste piégé jusqu'à sa disparition. La faible solubilité du krypton limite son accumulation dans les eaux de pluie. Le transfert du

krypton au sol peut se faire par des procédés de diffusion, mais dans des proportions très faibles (0,05 %). Une faible quantité de krypton (0,04 %) va être transférée aux océans.

La probabilité de contamination par les gaz rares est donc très faible. Cependant l'exposition, même infime, existe. Celle-ci se produit par irradiation externe et par contamination interne après inhalation et absorption dans les tissus.

En ce qui concerne le ^{85}Kr , sa distribution dans le corps n'est pas uniforme : la concentration dans les tissus adipeux étant presque 50 fois plus élevée que cela dans d'autres parties du corps.

2. Les halogènes : l'iode

Il est classé dans le groupe de risque 3.

Sous sa forme radioactive ^{131}I , l'iode émet des rayonnements α et β . Elle a une période physique de 8 jours et une période effective de 7,6 jours.

L'iode est un oligoélément essentiel pour l'organisme humain car il intervient dans le fonctionnement de la thyroïde, plus précisément, dans la fabrication des hormones thyroïdiennes. De ce fait, une carence en iode peut entraîner des troubles plus ou moins graves du métabolisme. Les troubles sont d'autant plus importants que la carence est profonde et durable [23]. Chez l'enfant, les hormones thyroïdiennes jouent un rôle fondamental sur la croissance et le développement, en particulier au niveau du système nerveux central. Une forte carence en iode pendant la grossesse et les premiers mois de la vie est susceptible d'entraîner un crétinisme.

L'iode est concentré dans la glande thyroïde, d'où l'irradiation endogène de ce tissu en cas de contamination par l'iode radioactif. Le risque en est le développement ultérieur d'un cancer thyroïdien. Il existe une latence d'environ 10 ans entre l'irradiation et l'apparition d'un excès de cancer de la thyroïde. Une dose de 1 Gy délivrée dans l'enfance par des rayons X ou β à débit élevé augmente d'un facteur 8 le risque de cancer de la thyroïde.

Lors de l'accident de Tchernobyl, on a pu constater, dès 1990, une augmentation considérable du nombre de cancers thyroïdiens chez les enfants de moins de 15 ans au moment de l'accident ou irradié in-utero. Actuellement, près de 2 000 cas de cancers ont été dénombrés parmi ces enfants. L'incidence du cancer thyroïdien chez les enfants nés après 1987 est revenue aux valeurs qu'elle avait avant l'accident [19].

Lors d'un accident nucléaire, il est possible de prévenir l'irradiation de la thyroïde : le principe est de bloquer le captage par la glande de l'iode radioactif, en administrant une dose massive d'iode stable non radioactif. L'effet de protection de l'iode stable est dû à la dilution massive de la quantité infinitésimale d'iode radioactif qui réduit d'autant le captage par la glande des atomes radioactifs [24].

3. Les aérosols a

Du fait de leur fort pouvoir ionisant, les émetteurs \propto sont tous classés dans le groupe de risque 1.

a. L'uranium

Tableau Erreur ! Signet non défini. : caractéristiques des isotopes de l'uranium

Radionucléide	Emission	Période physique	Période effective
^{235}U	alpha, gamma	$7,04.10^6$ ans	100 j
^{238}U	alpha, gamma	$4,47.10^9$ ans	100 j

Le corps humain contient en moyenne 90 μg d'uranium, principalement distribués au niveau du squelette (66%), du foie (16%) et des reins (8%). Seules des situations accidentelles peuvent conduire à une accumulation d'uranium dans des teneurs susceptibles d'induire des effets délétères [27].

L'uranium est peu absorbé par l'Homme [16]. On estime que 1 à 5 % des poussières contenant de l'uranium pénètre dans la région pulmonaire. Le reste est déposé dans les voies respiratoires supérieures et peut être éventuellement avalé. Les particules d'uranium insolubles peuvent être retenues par les poumons pendant un long temps et constituent un risque de cancer localisé [12].

L'uranium est un ostéotrope reconnu : 85 % de l'uranium absorbé et métabolisé se dépose sur les os [31].

Le CIRC^{10[10]} n'a pas pu mettre en évidence l'effet cancérigène de l'uranium naturel chez l'homme même si les expérimentations animales tendent à prouver le contraire [8]. Les études sur les travailleurs exposés à l'uranium sont gênés par la difficulté de mesurer la dose de radiation, l'exposition simultanée à d'autres produits chimiques, les effets possibles de l'âge, de la confusion avec les dangers du tabac...

b. Le plutonium

La toxicité du plutonium est due aux rayons \propto et aux neutrons. La peau intacte constitue une barrière efficace vis-à-vis de la contamination externe par le plutonium. En revanche, il peut être inhalé ou incorporé par une blessure. Dans ce cas il passe dans le sang et se répartit dans les poumons, le foie et les os. Sa période biologique va dépendre de sa forme chimique [1].

Le plutonium est peu soluble. Le coefficient de diffusion à la surface du sol est très faible (environ $1.10^{-7} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$). Il est relativement immobile. Peu soluble dans l'eau, il n'est pas

^{10[10]} Centre International de Recherche sur le Cancer

lixivié et reste dans les horizons de surface où il subit l'érosion par le vent et l'eau, ce qui constitue sa principale voie de transport [18].

Tableau Erreur ! Signet non défini. : caractéristiques des isotopes du plutonium

Radionucléide	Emission	Période physique	Période effective
^{238}Pu	alpha, gamma	87,7 ans	61,9 ans
^{239}Pu	alpha, gamma	24 100 ans	> 100 ans
^{240}Pu	alpha, gamma	6 560 ans	> 100 ans
^{241}Pu	alpha, bêta, gamma	14,4 ans	12,33 ans

Etant peu absorbé par voie orale, une fois déposé au sol, le plutonium est peu transférable le long de la chaîne alimentaire. En cas d'ingestion, seulement 0,05 % de du plutonium sous forme soluble est absorbé. Ce chiffre augmente à 0,5 pour les bébés de moins d'un an, et jusqu'à 1 % pour les nouveaux-nés (moins de trois mois) [17]. En ce qui concerne les oxydes insolubles de plutonium, le taux d'absorption est de 0,1 % dans les trois premiers mois de la vie.

En revanche, le plutonium est bien absorbé par inhalation et peut stagner très longtemps dans les poumons.

Il est transféré aux plantes sous sa forme la plus soluble : Pu^{4+} .

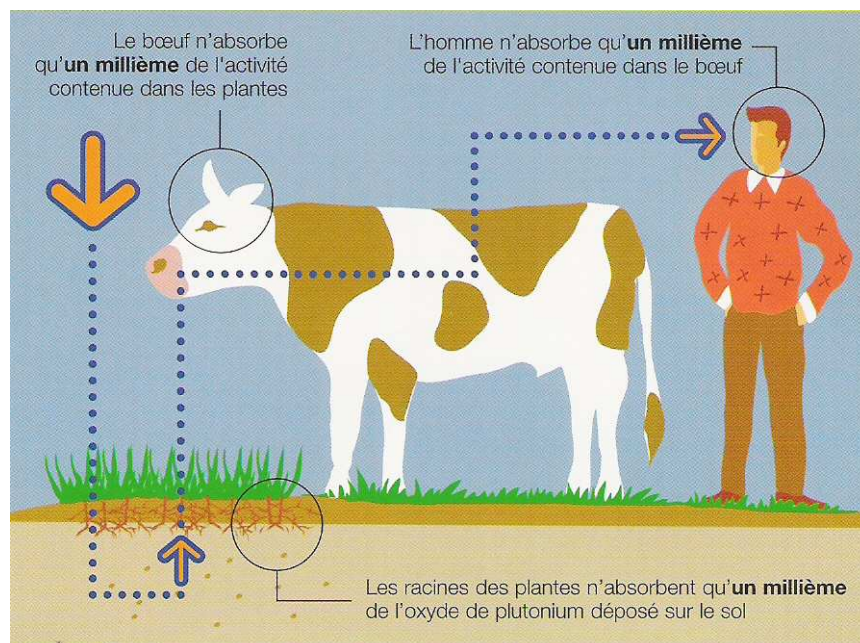


Figure Erreur ! Signet non défini. : transfert du plutonium le long de la chaîne alimentaire [1]

Dans le cas des formes très peu solubles (oxyde de plutonium PuO₂, mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium MOX [(U,Pu)O₂]), le tractus respiratoire est la principale cible, et l'essentiel du plutonium retenu dans l'organisme après plusieurs années demeure dans les poumons sous forme de particules minérales. Il provoque des réactions inflammatoires et peut induire des cancers pulmonaires.

Dans le cas des formes solubles, environ 10 %, demeurant sous cette forme est rapidement transférée au sang. Par cette voie, il rejoint les os (68 %) et le foie (23 %) où 1/10000^e est déposé. Le squelette constitue la principale cible pour l'apparition de tumeurs [13]. Chez les nouveaux-nés le phénomène d'absorption est plus élevé, ce qui les rend plus vulnérables en cas d'exposition au plutonium.

Tableau Erreur ! Signet non défini. : **période biologique du plutonium dans différents tissus** [5]

Tissus	Période biologique
Squelette	50 ans
Foie	10 ans
Ovaires	10 ans
Testicules	10 ans
Tissus mous	
ST0 ^{11[11]}	1 jour
ST1	1450 jours
ST2	100 ans

Les résultats des recherches du CICR mettent en évidence que l'inhalation d'aérosol de ²³⁹Pu est à l'origine de cancers du poumon, de cancers du foie et d'ostéosarcomes [8].

c. L'américium

L'américium est issu de la fission du plutonium 241. Sous sa forme radioactive 241, l'américium émet des rayonnements alpha et gamma. Sa période physique est de 432,7 ans et sa période effective est supérieure à 100 ans.

L'américium inhalé se comporte comme le plutonium mais son absorption est plus rapide.

Les taux d'absorption de l'américium ingéré sont identiques à ceux du plutonium sous forme soluble.

Les principaux sites de dépôt de l'américium dans le corps humain sont le foie (50%) et le squelette (30%) [30].

Tableau Erreur ! Signet non défini. : **distribution de l'américium dans le corps humain** [1]

Tissus	Distribution (%)	Période biologique
Squelette	30	50 ans
Foie	50	2 ans
Ovaires	0,01	10 ans
Testicules	0,035	10 ans

^{11[11]} Soft Tissue ; 0 = faible fraction retenue (liquide extracellulaire) ; 1 = rétention à moyen terme ; 2 = rétention à long terme (graisse, muscles, tissus sous-cutanés)

Sang	11,955	
Tissus mous		
ST0	6	0,5 jours
ST1	1,6	50 jours
ST2	0,4	100 ans

Conclusion

Depuis sa découverte par Marie Curie en 1896, la radioactivité fait l'objet de nombreuses applications dans la vie courante. Cependant, elle engendre des effets sanitaires dangereux pour l'Homme. Entre autre, elle est à l'origine de détérioration de l'ADN, d'effets tératogènes et héréditaires, mais également de cancers. Les dangers existent également pour des expositions partielles, en touchant la peau, les os, les reins, les yeux...

Les éléments rejetés par le CEA de Valduc n'échappent pas à cette règle générale. Ils ont donc un potentiel radiotoxique avéré pour l'environnement et la santé humaine. Même si les gaz rares ne semblent pas être une source de risque importante, ce n'est pas le cas de l'iode et des émetteurs α .

Etant donné la toxicité de ces éléments, il semble nécessaire de réaliser des études complémentaires pour connaître la dispersion de ces éléments dans les différents compartiments de l'écosystème avoisinant Valduc. En effet, dans ces conditions, la surveillance de l'environnement n'est pas nécessaire, elle est indispensable. Pour effectuer une étude des risques sanitaires et ainsi connaître l'impact exact de ces rejets sur l'environnement et la santé humaine, il faudrait connaître les rejets exacts, élément par élément, données dont ne dispose pas la SEIVA pour le moment. Il faudrait également mesurer l'activité des différents éléments dans l'environnement, comme cela est fait pour le tritium. Or, la surveillance effectuée à l'heure actuelle englobe plusieurs radioéléments (mesure des activités α et β globales).

Bibliographie

- [1] **AREVA**, 2005 - *En savoir plus sur le plutonium* -.
- [2] **Arrêté du 3 mai 1995** relatif à l'autorisation de rejets d'effluents radioactifs gazeux par le centre d'études de Valduc, Journal Officiel n°111 du 12 mai 1995, p8000.
- [3] **ARTUS J.-C.**, 1997. - *Environnement, énergie, santé* -. Société Française d'Energie Nucléaire.
- [4] **BERTIN M.**, 1989. - *Les effets biologiques des rayonnements ionisants* -.Editions Sodel.
- [5] **Calliope**, CD-Rom, 1999. - *Un outil pédagogique en dosimétrie interne* -. Collection IPSN.
- [6] **CEA**. - *CEA Valduc de la recherche à l'industrie* -.
- [7] **CEA**, 2002. - *L'homme et les rayonnements* -.
- [8] **CIRC, OMS**, 2000. - *IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans* -. Ionising radiation part 2 : some internally deposited radionuclides.
- [9] **DELACROIX D., GUERRE J.-P., LEBLANC P.**, 2004. - *Guide pratique : radionucléides et radioprotection* -. EDP Sciences.
- [10] **DE ROUFFIGNAC C.**, 2003. - *Les effets des rayonnements ionisants sur le rein* -. CLEFS CEA n°48, p48-51.
- [11] **DESCHAMPS J.**, 1998. - *Glossaire des mots clés de la sécurité nucléaire* -. Secrétariat général du comité interministériel de la sécurité nucléaire.
- [12] **FRIBERG L., NORDBERG G.-F., KESSLER E., VOUK V.-B.**, 1986. - *Handbook of the Toxicology of Metals* -. Editions Elsevier Science Publishers B.V..
- [13] **FRITSCH P.**, 2003. - *Le devenir biologique du plutonium* -. CLEFS CEA n°48, p35-36.
- [14] **GAMBINI D.-J.**, 1997. - *Manuel pratique de radioprotection* -. Editions Techniques et documentation.
- [15] **GRAUBY A.**, 1988. - *Evaluation de l'impact des rejets radioactifs dans l'environnement. La radioécologie* -. Actes du colloque nucléaire, santé, sécurité. p391-398.
- [16] **HAMILTON A., HARDY H.-L.**, 1974. - *Industrial Toxicology* -. Editions Publishing Sciences Group, Inc.
- [17] **HARRISON J.-D.**, 1983. - *Gut Uptake Factors for Plutonium, Americium and Curium* -. Govt Reports Announcements & amp, Issue 25.
- [18] **INTERNATIONAL PROGRAMME ON CHEMICAL SAFETY**, 1983. - *Environnemental health criteria 25* -.
- [19] **LEENHARDT L., MENEGAUX F., FRANC B., HOANG C., SALEM S., BERNIER M.-O., DUPASQUIER-FEDIAEVSKY L., LE MAROIS E., ROUXEL A., CHIGOT J.-P., CHERIE-CHALLINE L., AURENGO A.**, 2004. - *Cancers de la thyroïde* -. EMC-Endocrinologie, Volume 2, Issue 1, p1-38.
- [20] **Loi n°2002-276 du 27 février 2002** relative à la démocratie de proximité art. 132, Journal Officiel du 28 février 2002 (Art. L110-1 du Code de l'Environnement).
- [21] **MACHURON-MANDARD X., ARMAND P., PILI E.**, 2003. - *Air, eau et alimentation* -. CLEFS CEA n°48, p4-8.
- [22] **MARTIN M.**, 2003. - *Conséquences d'une irradiation ionisante sur la peau humaine* -. CLEFS CEA n°48, p53-55.
- [23] **MENETRIER F.**, 2003. - *Questions de santé... l'iode et la thyroïde* -. Les défis du CEA.
- [24] **ORGIAZZI J.**, 1996. - *L'iode stable et la prévention des expositions à l'iode radioactif* -. Médecins et rayonnements ionisants n° 12, p4-9.

- [25] **PLAUD C.**, 1998. - *Effets biologiques des rayonnements ionisants* -. EDF.
- [26] **PONCY J.-L.**, 2003. - *Le squelette, une cible privilégiée* -. CLEFS CEA n°48, p51-52.
- [27] **QUEMENEUR E.**, 2003. - *L'uranium, chaque jour mieux connu* -. CLEFS CEA n°48, p31-34
- [28] **SEYVE C.**, 2005. - *Les rejets radioactifs des installations nucléaires* -. Revue Générale Nucléaire n°1, p37-41.
- [29] **STAUNTON S.**, 2003. - *Transfert sol-plante* -. CLEFS CEA n°48, p9-10.
- [30] **SUGIER A.**, 2005. - *Les recommandations de la CIPR : les raisons d'un changement* -. Revue Générale Nucléaire n°1, p37-41.
- [31] **SULLIVAN J.-B. Jr., KRIEGER G.-R.**, 1992. - *Hazardous Materials Toxicology/Clinical Principles of Environmental Health* -. Editions Williams and Wilkins.
- [32] **VINCENT-NAULLEAU S.**, 2003. - *Transfert chez l'animal* -. CLEFS CEA n°48, p11-13.
- [33] www.cea.fr

Sites Internet consultés:

www.seiva.fr

www.industrie.gouv.fr/energie/nucleair/textes/110q-06.htm

www.dissident-media.org/infonucleaire/blague_etude.html

www.asn.gouv.fr/cli

www.legifrance.gouv.fr

www.cite-sciences.fr/francais/ala_cite/expo/tempo/aluminum/science/mendeleiev/index.html

www.francenuc.org/fr_sites/bourg_val_f.htm

www.hc-sc.gc.ca/hecs-sesc/effets_radiologique/publication/evaluerdose/tdm.htm

www.dissident-media.org/infonucleaire/armes_uranium.html

<http://toxnet.nlm.nih.gov>

Lexique

ADN : Acide DésoxyriboNucléique. Molécule contenant l'ensemble des informations génétiques. Elles constituent les chromosomes et leurs différents segments forment les gènes, supports des caractères héréditaires.

Advection : déplacement d'une masse de gaz dans le sens horizontal.

CIPR : Commission Internationale de Protection Radiologique. Ensemble de personnalités scientifiques de très nombreux pays qui étudient les effets des rayonnements ionisants sur l'organisme et émettent des recommandations en matière de protection radiologique.

Effluents : liquides ou gaz contenant des substances radioactives. Leur activité est réduite par des dispositifs appropriés avant leur rejet ou leur utilisation.

Erythème : rougeur de la peau due à une accumulation anormale de sang dans les vaisseaux.

EURATOM : communauté européenne de l'énergie atomique. Elle a été créée en 1957 et a pour mission générale de contribuer à la formation et à la croissance des industries nucléaires et au développement des échanges avec les autres pays. Cet organisme intervient notamment pour le contrôle des matières nucléaires dans les centrales.

Incidence : pourcentage de maladie observé.

Isotopes : ensemble des atomes d'un élément chimique donné, ayant le même nombre de protons. Un élément chimique donné peut donc comprendre plusieurs isotopes différents entre eux par le nombre de neutrons. En conséquence tous les isotopes d'un même élément ont les mêmes propriétés chimiques, mais des propriétés physiques différentes (masse en particulier).

Ostéotrope : qui a des affinités pour les tissus osseux ;

Phlyctène : lésion cutanée élémentaire formée d'une poche en saillie remplie de liquide (= cloque).

Radioélément : élément chimique comportant au moins un isotope naturellement ou artificiellement radioactif.

Radionucléide : isotope radioactif. Ce terme est utilisé par abus de langage en lieu et place du terme radioélément, alors qu'il ne désigne que le noyau d'un atome.

Radiotoxicité : toxicité due aux rayonnements ionisants émis par un radioélément ingéré ou inhalé.

Tératogène : qui produit des malformations chez l'embryon.

Turbulence : mode d'écoulement d'un fluide dans lequel se superpose au mouvement moyen un mouvement d'agitation aléatoire.
