Radioactivité d'origine naturelle dans l'environnement en France : niveaux non perturbés par l'homme

Ph. PICAT¹, D. CALMET^{2,*}, D. LOUVAT¹, F. VRAY¹, N. LEMAITRE¹,
G. LINDEN¹, P. BARBEY³, G. PIGREE³, T. BOURCIER⁴, F. LEVY⁵, S. LE BAR⁵,
Y. BARON⁶, D. DELACROIX², E. PANAÏVA², T. DE BRUYNE², J.Y. HERVÉ²,
P. BEGUINEL², N. CABANNE², A. DE PAEPE⁷, C. SANTUCCI⁸,
T. PROT⁸, J.L. MATRAY⁹, J.L. TILLIE¹⁰

(Manuscrit reçu le 10 avril 2002, accepté le 3 juin 2002)

RÉSUMÉ

Quelles sont les valeurs qui caractérisent sur le territoire français les rayonnements ionisants et les radionucléides d'origine naturelle ? Comment distinguer dans le résultat d'une mesure la part qui résulte éventuellement d'une activité humaine ? Afin d'essayer de répondre à ces questions, un questionnaire a été adressé aux différents organismes qui effectuent en France des mesures de radioactivité dans l'environnement. Les informations mentionnées dans cette étude se rapportent exclusivement à des observations faites dans l'environnement à l'extérieur des bâtiments et du périmètre des installations nucléaires de base (INB). En outre, elles ne concernent, sauf cas particuliers signalés, que des mesures de rayonnements ou de radioéléments d'origine naturelle dont les résultats n'ont pas été perturbés par l'action de l'homme. L'enquête montre la difficulté actuelle de dresser en France un bilan exhaustif des connaissances acquises concernant les caractéristiques du bruit de fond radioactif d'origine naturelle dans l'environnement. Aujourd'hui en France, dans le domaine de la radioactivité naturelle, les efforts consentis manquent de coordination et d'orientation vers certaines priorités. À ce titre, les mesures des ^{238}U et ^{232}Th précurseurs des ^{226}Ra et ^{228}Ra , des descendants solides émetteurs alpha du radon (par la mesure des EAP du ^{222}Rn et ^{220}Rn), des émetteurs gamma post émanation (^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{212}Pb), du ^{210}Pb , ^{210}Po et du ^{14}C doivent être privilégiées.

Abstract

Natural radioactivity in the environment of France: levels free from human interference.

On the french territory which levels are characteristic of ionising radiation and which of radionuclides natural in origin? Is it possible to distinguish the portion of

* Auteur pour correspondance : CEA/DAM/DMSE, BP 12, 91680 Bruyères-le-Châtel, France.

¹ IRSN, France.

² CEA, France.

³ Association pour le contrôle de la radioactivité dans l'ouest, France.

⁴ EDF, France.

⁵ COGEMA, France.

⁶ Marine nationale, France.

⁷ Centre d'essais et de contrôle de la radioactivité, France.

⁸ Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, France.

⁹ Bureau de recherches géologiques et minières, France.

¹⁰ Direction générale de la concurrence, consommation et répression des fraudes, France.

a measurement readily attributable to man-made sources? In an attempt to answer these questions, a questionnaire was sent to the various bodies measuring environmental radioactivity in France. Information contained in this paper relates solely to observation of the environment (open spaces) outside buildings and beyond the perimeter of nuclear facilities. Further more, it concerns the measurement of radiation or of radionuclides natural in origin where the results have not been influenced by human activity, with the exception of specifically mentioned cases. The survey illustrates the present difficulty of assessing the acquired data on the characteristics of natural radioactive background noise in the environment in France. Efforts exerted in France in the area of natural radioactivity lack coordination and a shared setting of priorities. In this regard, the measurement of ^{238}U and ^{232}Th precursors to ^{226}Ra and ^{228}Ra of solid alpha-emitting radon daughters (by measuring PAE of ^{222}Rn and ^{220}Rn), of post-emanation gamma emitters (^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{212}Pb) and of ^{210}Pb , ^{210}Po and ^{14}C should be given top priority.

1. Introduction

Dans le monde, seules quelques zones habituellement proches de sites où se sont produits des accidents nucléaires majeurs, comme Tchernobyl en Ukraine et Kyshtym en Russie, se caractérisent par des niveaux d'activité des radioéléments d'origine artificielle présents dans l'environnement plus importants que ceux dus aux radioéléments d'origine naturelle.

En tout autre lieu de la planète, l'exposition aux rayonnements ionisants des populations résulte principalement des irradiations externes et internes liées à des sources de radioactivités naturelles (Jammet, 1984 ; UNSCEAR, 1988, 1993 ; Thébaud *et al.*, 1998). Des différences notables apparaissent toutefois au niveau des isotopes radioactifs naturels détectés et de leurs concentrations selon les caractéristiques géologiques, orographiques et biologiques de la région, de l'écosystème ou du constituant de la biosphère considéré. Enfin, l'existence d'installations, en fonctionnement ou à l'arrêt, qui produisent ou détiennent des matières radioactives d'origine naturelle, peut également localement modifier les niveaux d'activité de ces isotopes ou éléments naturels.

Quelles sont donc les valeurs qui caractérisent les rayonnements ionisants et les radionucléides d'origine naturelle sur le territoire français ? Comment distinguer dans le résultat d'une mesure la part qui résulte éventuellement d'une activité humaine ? L'impact dosimétrique de cette dernière doit en effet être comptabilisé dans la limite de dose efficace de 1 000 μSv par an qui s'applique depuis le 13 mai 2000 aux personnes du public dans tout État membre de la Communauté européenne (JOCE, 1996).

Afin d'essayer de répondre à l'ensemble de ces questions, un questionnaire a été adressé aux différents organismes qui effectuent en France des mesures de

radioactivité dans l'environnement, qu'ils interviennent dans un but de contrôle, y compris d'auto-contrôle, de recherche ou d'expertise, en tant qu'exploitants, services de l'État, entreprises privées ou associations (Tab. I)

Les informations mentionnées dans cette étude se rapportent exclusivement à des observations faites dans l'environnement à l'extérieur des bâtiments et du périmètre des installations nucléaires de base (INB). En outre, elles ne concernent, sauf cas particuliers signalés, que des mesures de rayonnements ou de radioéléments d'origine naturelle dont les résultats n'ont pas été perturbés par l'action de l'homme.

2. Composantes du bruit de fond radioactif naturel et causes de perturbation

Dans la biosphère, l'exposition des êtres vivants aux radiations ionisantes issue de sources naturelles résulte de l'existence de rayonnements et de radionucléides d'origine cosmique et tellurique.

2.1. Rayonnement cosmique

Il a pour origine le bombardement continu de la Terre par des particules chargées de hautes énergies issues de l'espace intersidéral. Ces particules cosmiques primaires interagissent avec les constituants de l'atmosphère terrestre et donnent naissance au niveau du sol à un rayonnement composé de 80 % de muons et 20 % d'électrons. L'intensité de ce rayonnement varie principalement en fonction de l'altitude, de la latitude et du cycle de 11 ans de l'activité solaire.

Au niveau de la mer et à une latitude de 45°, l'irradiation externe¹¹ associée aux particules chargées du rayonnement cosmique, est de 31 nGy/h et représente pour un individu qui séjourne en moyenne 20 % de son temps à l'extérieur des bâtiments, une dose annuelle¹¹ due aux muons de 54 µSv, celle due aux neutrons étant de 16 µSv.

À titre de comparaison, les doses annuelles des personnes empruntant régulièrement l'avion et des personnels navigants peuvent atteindre 5 000 µSv par an.

2.2. Radioéléments naturels d'origine cosmique

Les réactions des particules cosmiques primaires avec l'azote, l'oxygène et l'argon présents dans les couches supérieures de la stratosphère donnent aussi

¹¹ Ces valeurs citées dans ce paragraphe sont extraites de rapports (UNSCEAR, 1988, 1993) et correspondent à des moyennes mondiales pour des adultes.

TABLEAU I
Principaux organismes effectuant des mesures de radioactivité dans l'environnement en France.
Principal bodies measuring environmental radioactivity in France.

Organisme			O B J E C T I F S (*)													
ref.	Nom	Métier de base	Tutelle	Financement	Types de mesures réalisées						Constituants mesurés					
					rech.	globale	sélective	isotopes naturels	isotopes artificiels	atmosphère	eaux douces	milieu marin	milieu terrestre	aliments		
I	ACRO	Association protection de l'environnement	Association loi 1901	État (variable) Prestations Cotisations	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
II	ALGADE	Laboratoire d'expertise	Filiale groupe COGEMA	Prestations (100 %)	•			•	•	•	•	•	•	•	•	
III	ANDRA	Gestion déchets	Ministères Industrie Environnement Recherche	Producteurs de déchets (100 %)	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
IV	BRGM	Sciences de la terre	Ministères Environnement Recherche	État Prestations (90 %)	•			•	•	•	•	•	•	•		
V	CEA-R	Recherche nucléaire	Ministères Recherche Industrie Défense	État Prestations (79 %)	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
VI	CNRS CFR	Recherche	Ministère Recherche	État Prestations (90 %)	•			•	•	•	•	•	•	•	•	
VII	COGEMA retraitement	Cycle du combustible	Ministère de l'Industrie	Ventes services retraitement du combustible	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
VIII	CRECEP	Analyse des eaux	Mairie de Paris D.P.E.	Mairie de Paris et distributeurs d'eau	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	

Légende : *

naissance à une série de radionucléides cosmogéniques tels que le tritium (^3H), le béryllium-7 (^7Be), le carbone-14 (^{14}C) et le sodium-22 (^{22}Na) dont les principales caractéristiques sont présentées au tableau II.

Le taux de production de ces radioéléments varie aussi en fonction de l'altitude, de la latitude et du cycle solaire (Calmet *et al.*, 1998a). Au niveau du sol, leur abondance et leur répartition dans la biosphère dépendent par ailleurs de nombreux phénomènes :

- échanges entre la stratosphère et la troposphère,
- dépôt et captation des formes gazeuses et particulaires (aérosols) sur les surfaces et le couvert végétal,
- incorporation de certains isotopes (^3H , ^{14}C) dans la biomasse lors de la photosynthèse.

L'intensité de ces mécanismes est liée à l'état physiologique des plantes et varie également selon la saison, le lieu et le moment de la journée d'où de grandes fluctuations susceptibles d'être observées dans l'environnement (Belot *et al.*, 1996).

La dose annuelle due aux radionucléides cosmogéniques provient essentiellement du ^{14}C et représente 12 μSv . Les contributions dues aux ^{22}Na , ^7Be et ^3H sont beaucoup plus modestes et atteignent respectivement 0,15, 0,03 et 0,01 μSv .

Il faut toutefois noter que certains isotopes comme le tritium et le carbone-14 peuvent être aussi produits de façon artificielle (Caput *et al.*, 1981). Par exemple, dans les centrales électronucléaires françaises, à la production de 1 kWh est associé un rejet en tritium sous forme liquide de 1,7 kBq (OPRI, 1997). En 1997, l'ensemble du parc français a ainsi généré 0,67 PBq de tritium ce qui équivaut à environ 1 % de sa production naturelle annuelle mondiale (Tab. II). D'autres sources artificielles de tritium plus anciennes existent, telles celles liées aux anciennes explosions aériennes d'engins nucléaires qui aujourd'hui ont une importance moindre. Enfin, les usines de retraitement du combustible constituent une source industrielle importante de tritium, le seul site de La Hague en ayant rejeté, en 1995, de l'ordre de 9,6 PBq dans la Manche et 0,085 PBq dans l'atmosphère.

Aussi, les concentrations en tritium en de nombreuses régions ne peuvent être considérées comme imputables au seul bruit de fond d'origine naturelle qui dans les eaux représente une activité qui varie entre 0,12 à 0,24 Bq l^{-1} (Tort *et al.*, 1997).

2.3. Radioéléments naturels d'origine tellurique

Aujourd'hui ne subsistent en raison de leur période radioactive, qu'une vingtaine de radionucléides présents au moment de la formation de la Terre. Certains comme

TABLEAU II
Caractéristiques des principaux radionucléides naturels d'origine cosmique.
Characteristics of main natural radionuclides of cosmic origin.

Radio- nucléide	Production naturelle annuelle	Inventaire global	Troposphère		Période physique	Modes de décroissance	Période effective	Organe critique	Coefficient de dose pour la population	
			Fraction présente	Concentration moyenne					Ingestion	Inhalation (2)
Unités	PBq/ao	PBq	sans dimension	mBq/m ³	an ou jour	énergie MeV fréquence (%)	an ou jour			10 ⁻³ Sv/Bq
³ H	72	1 275	0,004	1,4	12,3 a	β ⁻ 0,0186 (100 %)	12 j	tout le corps	0,018 (3) 0,042 (4)	0,26 (3) * (5)
⁷ Be	1 960	413	0,11	12,5	53,3 j	β ⁺ (89,5 %) γ 0,48 (12 %)	41 j	TGI (6)	0,028	0,055
¹⁴ C	1,5	12 750	0,016	56,3	5 730 a	β ⁻ 0,158 (100 %)	10 a	graisse	0,58	5,8 0,0065 (7)
²² Na	0,12	0,44	0,017	0,0021	2,6 a	β ⁺ 0,59 (89 %) K (10 %) γ 1,27 (99 %)	11 j	tout le corps	3,2	1,3

(1) Inventaire global estimé par la relation : production annuelle × 1,44 × période physique. (2) Valeur la plus restrictive dans le cas d'un adulte (âge > 17 ans). (3) Pour l'eau tritiée. (4) Pour le tritium inclus dans un composé organique. (5) Pour le tritium gazeux, coefficient = 1,8 × 10⁻¹⁵ Sv Bq⁻¹. (6) TGI = tractus gastro-intestinal. (7) Pour le carbone sous forme de dioxyde (CO₂) (JOCE, 1996 ; UNSCEAR, 1988, 1993 ; Patti *et al.*, 1990).

le potassium-40 (^{40}K) se désintègre en donnant directement un élément stable. D'autres, au contraire, comme l'uranium-238 (^{238}U), le thorium-232 (^{232}Th) et l'uranium-235 (^{235}U) donnent naissance à des séries de descendants radioactifs de propriétés chimiques et physiques distinctes de celles des nucléides pères (SFRP, 1998). L'ensemble de ces filiations constitue les familles radioactives naturelles. Les caractéristiques des principaux radioéléments naturels d'origine tellurique sont présentées au tableau III.

Leur comportement dans la biosphère est conditionné par les propriétés des éléments chimiques auxquels se rattache chaque isotope mais aussi par les caractéristiques des eaux, des sols, de la flore et de la faune (AIEA, 1994). Par exemple, l'existence de formes gazeuses et solubles anioniques pour un même isotope, est favorable à sa migration dans l'environnement. *A contrario*, des formes particulières ou solubles cationiques conduisent en général à une mobilité plus réduite. Il en résulte des variations importantes des concentrations des isotopes des familles de l'uranium et du thorium dans les différents compartiments de la biosphère.

En outre, les possibilités de modification par l'homme du bruit de fond radioactif naturel d'origine tellurique sont multiples (EC, 1998), notamment à proximité des sites d'extraction et de traitement des minerais d'uranium ou de thorium, des anciennes usines d'utilisation du radium-226 (peinture, horlogerie, médecine), mais aussi au voisinage des usines de production d'engrais phosphatés ou des sites d'extraction de gaz et de pétrole (Aigueperse *et al.*, 1981 ; Descamps et Baudin-Jaulent, 1987 ; Zettwoog *et al.*, 1997).

La dose annuelle due au ^{40}K est limitée à $170\ \mu\text{Sv}$ ¹². Une valeur identique est atteinte pour les isotopes de période longue des familles de ^{238}U et du ^{232}Th .

Les doses annuelles dues à l'inhalation des isotopes gazeux du radon (^{222}Rn et ^{220}Rn) sont évaluées séparément car elles résultent de modalités particulières de transfert dans l'environnement (ICRP, 1993). Leur impact chez l'homme est en effet lié à l'existence de descendants solides émetteurs alpha à vie courte (^{218}Po , ^{214}Po et ^{212}Bi) qui se déposent dans les voies respiratoires. Les doses annuelles dues à l'inhalation des ^{222}Rn , ^{220}Rn et à leurs descendants sont estimées respectivement à $60\ ^{13}$ et $10\ \mu\text{Sv}$.

¹² Compte tenu de son contrôle homéostatique dans le corps humain, où sa concentration est de l'ordre de 0,18 %.

¹³ Pour un individu séjournant 20 % de son temps à l'extérieur des bâtiments, une concentration moyenne en ^{222}Rn dans l'air de $10\ \text{Bq m}^{-3}$ et un facteur d'équilibre de 0,6 entre le ^{222}Rn et ses descendants à vie courte.

TABLEAU III
Caractéristiques des principaux radionucléides naturels d'origine tellurique.
Characteristics of main natural radionuclides of telluric origin.

Radio nucléide	Période physique	Modes de décroissance énergie en MeV abondance (%)	Période effective jour	Organe le plus exposé	Coefficient de dose pour la population (1)		Observations
					ingestion	inhalation	
					10^{-3} Sv Bq ⁻¹		
⁴⁰ K	$1,28 \times 10^{10}$ a	β 1,32 (89) γ 1,46 (11)			6,2	2,1	Régulation homéostatique chez l'homme
²³⁸ U	$4,5 \times 10^9$ a	α 4,19 (100) γ 0,048 (23)	100	TGI	45	8 000	Nucléide père famille ²³⁸ U
²³⁴ U	$2,5 \times 10^5$ a	α 4,77 (72) 4,72 (28)	100	TGI	49	9 400	
²³⁰ Th	$7,7 \times 10^4$ a	α 4,68 (76) 4,61 (24)	70 000	os	210	100 000	
²²⁶ Ra	$1,6 \times 10^3$ a	α 4,78 (95) 4,59 (5)	16 000	os	280	9 500	
²²² Rn	3,8 j	α 5,49 (99)	(2)	poumons		(2)	Gaz radioactif
²¹⁸ Po	3,05 min	α 6,0 (99)					
²¹⁴ Pb	0,447 h	β^- 1,03 (6)			0,14	15	Descendants
²¹⁴ Bi	0,332 h	β^- 3,18 (99) γ 0,61		poumons	0,11	14	solides à vie courte du ²²² Rn
²¹⁴ Po	160 μ s	α 7,68 (100)					
²¹⁰ Pb	22,3 a	β^- 0,017 (85) 0,063 (15)	1200	corps entier, reins	690	5 600	
²¹⁰ Po	138,4 j	α 5,305 (100)	45	rate, reins	1200	4 300	
²³⁵ U	$7,17 \times 10^8$ a	α 4,354 (35) 4,37 (25) 4,56 (6,7) γ 0,185 (55)	100	TGI	47	8 500	
²³² Th	$1,4 \times 10^{10}$ a	α 4,01 (76) 4,61 (24) γ 0,059 (24)	70000	os	230	110 000	
²²⁸ Ra	6,7 a	β^- 0,02 (100)	2120	os	690	16 000	
²²⁴ Ra	3,64 j	α 5,68 (95) 5,44 (5) γ 0,241 (5)	3,6	os	65	3 400	
²²⁰ Rn	55 s	α 6,28 (99)	(2)	poumons			Gaz radioactif
²¹⁶ Po	0,16 s	α 6,78		poumons			
²¹² Pb	10,6 h	β^- 0,34 (84) 0,58 (12)	0,44	TGI, reins	6,0	190	Descendants solides à vie courte du ²²⁰ Rn
²¹² Bi	1,01 h	β^- 2,25 (64) α 6,09 (36)	0,04	TGI	0,26	31	
²¹² Po	0,3 μ s	α 8,78					

(1) Valeur la plus restrictive dans le cas d'un adulte (âge > 17 ans). (2) Les effets biologiques des gaz radioactifs ²²²Rn et ²²⁰Rn sont dus à leurs descendants solides à vie courte émetteurs alpha. L'énergie alpha totale des particules émises qui s'exprime en J m⁻³, est le paramètre essentiel qui détermine la dose délivrée notamment au niveau des poumons par les descendants du radon.

2.4. Rayonnement tellurique

Il a pour origine les radionucléides émetteurs gamma présents dans les roches et les sols. Le ^{40}K et les descendants émetteurs gamma des séries de ^{238}U et du ^{232}Th sont les principaux isotopes responsables de l'irradiation externe d'origine tellurique des populations (Madelmont *et al.*, 1984).

L'existence d'un élément chimique gazeux, le radon, dans les deux familles de l'uranium et du thorium contribue à réduire, du fait de son exhalation des sols et des roches, l'exposition tellurique imputable aux émetteurs gamma post-émanation présents dans les deux familles (Tab. III).

L'irradiation d'origine tellurique est en moyenne de 60 nGy h^{-1} . Elle peut varier entre 10 et 200 nGy h^{-1} en fonction des concentrations en ^{40}K et en radionucléides émetteurs gamma des familles de ^{238}U et du ^{232}Th présents dans les sols. Une autre cause de variation rapide est due au dépôt sur le sol, en cas de pluie, des descendants solides émetteurs gamma post-émanation, du ^{222}Rn notamment.

La dose moyenne annuelle associée à l'irradiation naturelle d'origine tellurique est estimée à $74 \mu\text{Sv}$ pour un individu séjournant 20 % de son temps à l'extérieur des bâtiments.

2.5. Autres causes d'irradiation naturelle des populations

La présence de radionucléides émetteurs gamma dans les matériaux de construction ainsi que de radon et de thoron dans l'air des bâtiments conduit à des doses moyennes annuelles mondiales respectivement de 410, 700^{14} et $150 \mu\text{Sv}$, pour un individu qui séjourne en moyenne 80 % de son temps à l'intérieur des bâtiments.

Les niveaux de radioactivité naturelle des matériaux de construction et les concentrations en radon et thoron dans les bâtiments ne sont pas abordés dans cet article. Pour la France, des informations sont disponibles dans les publications (Métivier et Robé, 1998 ; Robé *et al.*, 1992a), une étude des zones potentiellement exposées à de fortes concentrations en radon étant en cours¹⁵.

¹⁴ Pour une concentration moyenne en ^{222}Rn dans l'air de 40 Bq m^{-3} et un facteur d'équilibre de 0,4 entre le ^{222}Rn et ses descendants à vie courte.

¹⁵ Collaboration BRGM/IPSN dans le cadre du programme Environnement et Santé.

3. Méthodes de sélection et de collecte des données

Dresser un inventaire en France des niveaux de radioactivité naturelle dans l'environnement qui ne soient pas perturbés par l'action de l'homme à l'extérieur des habitations, implique d'identifier les installations susceptibles de modifier le bruit de fond radioactif d'origine naturelle.

À cet effet, les organismes qui ont participé à cet inventaire ont reçu un jeu de tableaux (Fig. 1) où les résultats radioactifs relatifs à chaque constituant ou composante de la biosphère devaient être reportés en fonction de leur zone d'origine (Tab. IV).

- types de mesures réalisées par les organismes,
- caractéristiques des radionucléides naturels,
- questionnaire adressé aux organismes,
- mesures disponibles sélectionnées

• Méthode de présentation

La lettre P indique que les niveaux observés ne peuvent être considérés comme appartenant au bruit de fond naturel

P
IV / 6 / h / 4

* Pour les mesures occasionnelles, c'est le nombre d'années pendant leur réalisation qui est pris en compte.

Figure 1 – Modèle de présentation des données regroupées dans les tableaux VI à XVI.

Presentation of the data grouped in Tables VI to XVI.

TABLEAU IV
Radionucléides d'origine naturelle dans l'atmosphère et rayonnement gamma ambiant en France.
Natural radionuclides in the atmosphere and ambient gamma radiation in France.

Constituant ou composante	ÉCHANTILLONNAGE					Grandes mesures			
	Zone	Station	Prélevement	Mécanisme	Période	Valeurs moyennes annuelles (nitrates ou nitrates)(8)			
	Nombre	Type	Type	Fréq.	Observation	gaz Bq m^{-3}	gamma ambiant	mSv y^{-1}	Bq m^{-3}
gaz et vapeurs (Bq/m^3)	1	3	4	5	6	7	8	9	10
	amont du cycle	O	S						
	centrales	S							
	retraitement	O							
	autres	O	C	M					
	installations	O							
	hors	S							
	installation	O							
	amont du cycle	S							
	centrales	O							
aérosols (Bq/m^3)	1	3	4	5	6	7	8	9	10
	retraitement	O							
	autres	O	C	M					
	installations	O							
	hors	S							
	installation	O							
	amont du cycle	S							
	centrales	O							
	retraitement	O							
	autres	O	C	M					
rayonnement gamma ambiant (nGy/h)	1	3	4	5	6	7	8	9	10
	amont du cycle	O							
	centrales	O							
	retraitement	O							
	autres	O	C	M					
	installations	O							
	hors	S							
	installation	O							
	amont du cycle	S							
	centrales	O							

Origine des données (10) : CEA/Saclay.
Zone étudiée : (1) Type d'installation surveillée ; (2) Type c = continu ; d = discontinu ; l = instantané.
Prélevements : (3) Fréquence : a = annuel - l = Trimestriel - m = mensuel - dc = décennaire - h = hebdomadaire - j = journalier - s = semestriel - q = par quinzaine - v = variable.
(4) S = systématique - O = occasionnel.
(5) Total annuel = (3) x (6).
(6) Période d'observation : mesures systématiques (année de début de l'échantillonnage) ; mesures occasionnelles (période d'échantillonnage).
(7) Unités de mesure.
(8) Organisme à l'origine des données : cf. tableau 1 pour références.

Cinq zones étaient distinguées :

- celles dotées d'installations nucléaires liées à l'amont du cycle du combustible : mines, usines de traitement du minerai, de conversion et d'enrichissement de l'uranium, et de fabrication des combustibles dont les activités peuvent modifier la distribution des isotopes de la famille de l'uranium et du thorium dans l'environnement¹⁶ ;
- celles dotées de centrales électronucléaires qui rejettent, outre des radionucléides artificiels, du tritium et du carbone-14 ;
- celles où sont présentes des usines de retraitement de combustibles irradiés¹⁷, qui rejettent aussi du tritium et du carbone-14 mais avec des activités beaucoup plus importantes que celles mises en jeu sur un site EDF équipé de réacteurs à eau pressurisée (REP) ;
- celles où sont implantés les centres du Commissariat à l'énergie atomique (CEA), les bases de la Marine nationale ou les centres de stockage de déchets de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA). Selon la mission de ces établissements, des isotopes radioactifs naturels tant cosmogéniques que telluriques peuvent y être détenus, produits et/ou rejetés ;
- celles exemptes de toute INB pour lesquelles il convient toutefois de s'assurer qu'une installation industrielle non nucléaire ne manipule pas ou ne détient pas des matériaux radioactifs susceptibles de perturber les niveaux de radioactivité naturelle dans l'environnement.

Les figures 2 et 3 présentent respectivement la localisation des principaux sites où sont effectuées des mesures systématiques, soit *in situ* du rayonnement gamma ambiant, soit différées en laboratoire de la radioactivité d'échantillons prélevés dans l'environnement.

Compte tenu de l'abondance des données, de leur variation faible d'une année sur l'autre pour un radioélément donné et un constituant donné, de méthodes d'échantillonnage et de mesure différentes mises en œuvre par les organismes contactés, le recueil des données s'est effectué en tenant compte des prescriptions suivantes :

- pour les mesures à caractère systématique, liées en général au contrôle réglementaire des installations nucléaires et à la surveillance de l'environnement, seules les observations faites en 1997 avaient été prises en compte. Pour les mesures à caractère occasionnel associées plutôt aux recherches et expertises, la période de référence prise en compte correspondait à celle d'exécution de ces travaux,

¹⁶ Les usines de production d'engrais phosphatés ou qui manipulent des matériaux contenant du thorium ont été rattachées à cette catégorie d'installations.

¹⁷ Il est à noter que le retraitement des combustibles nucléaires a été arrêté à Marcoule fin 1998.

Légende :

Site sans source industrielle :

- niveau de la mer
- altitude intermédiaire
- ▲ sommets

Site avec source de radioactivité artificielle :

- centrales EDF
- retraitement
- * centres CEA
- autres (Marina, Andra)

Site avec source de radioactivité naturelle :

- sites miniers
- * conversion
- autres
- enrichissement

Figure 2 – Principaux sites de mesure permanente in situ du rayonnement gamma ambiant par balise(s) et/ou dosimètres.

Main permanent measuring sites for in situ measurement of ambient gamma radiation by probe or dosimeter.

Légende :

Site sans source industrielle :

niveau de la mer

☐ autres

* milieu rural

Site avec source de radioactivité artificielle :

centrales EDF

■ **retraitement**

* centres CEA

☐ autres (Marine, Andra)

Site avec source de radioactivité naturelle :

- sites miniers

* conversion
enrichissement

○ autres (phosphates, céramiques)

Figure 3 – Principaux sites de mesures systématiques de la radioactivité d'échantillons de l'environnement. Mesures différées en laboratoire.

Main permanent measuring sites for radioactivity in environmental samples. Measurement postponed to the laboratory.

- dans les deux cas précités, à partir de l'ensemble des valeurs disponibles était calculée la moyenne et précisées les valeurs minimale et maximale observées en 1997 (mesures systématiques) ou sur la période particulière consacrée à l'étude ou à l'expertise (mesures occasionnelles),
- enfin, seules les données correspondant à des mesures sélectives qui permettaient l'identification des isotopes naturels ont été recensées. D'autre part, seules les mesures dont le résultat n'était pas perturbé par une activité humaine ont été retenues.

4. Résultats

4.1. Remarques générales

Les plans d'échantillonnage et de mesure ont généralement pour objectif la détection des radioéléments d'origine artificielle. Seules la surveillance et l'étude des sites liés à la manipulation de matériaux contenant de l'uranium et du thorium se traduisent par la mise en œuvre d'une méthodologie systématiquement orientée vers la détection des radioéléments d'origine naturelle.

Les isotopes naturels sont souvent des radionucléides émetteurs alpha, bêta ou gamma de faible énergie (Tabs. II et III) dont la détection nécessite le recours à des techniques radiochimiques associées à des mesures nucléaires des rayonnements émis où les causes de perturbation du résultat de la mesure sont nombreuses¹⁸ (Robé *et al.*, 1992b).

En conséquence, la mesure sélective d'isotopes naturels est loin d'être systématique sur les échantillonnages réalisés. D'autre part, la priorité accordée à la recherche des radioéléments artificiels aboutit souvent à l'absence d'archivage exploitable des données sur les radioéléments naturels et ce même lorsque les mesures ont été effectuées.

Les résultats présentés dans ce document ne constituent en conséquence qu'une fraction des données existantes relatives à la radioactivité naturelle dans l'environnement en France. Selon la zone et le constituant concernés, les résultats retenus dans ce document émanent de l'organisme dont les archives apparaissaient les plus complètes¹⁹.

¹⁸ Par exemple, le phénomène d'auto-atténuation variable du rayonnement émis en fonction des caractéristiques nucléaires du radionucléide recherché et de la nature de l'échantillon mesuré.

¹⁹ Nombre d'observations disponibles, sensibilité des mesures et diversité des isotopes identifiés.

TABLEAU V

Rayonnement gamma ambiant en France (nGy h^{-1}). Niveaux non perturbés par l'action de l'homme. Mesures par balises ou dosimètres renouvelés périodiquement.

Ambient gamma radiation in France (nGy h^{-1}). Levels free from human interference. Measurements by probes or dosimeters that are regularly renewed.

Zone		Moyenne (min - max)	Nombre de stations	Années d'archives (origine des données)*
Amont du cycle		140 (80 - 240)	13	9 (II)
Centrales électronucléaires		80 (50 - 160)	21	9 (XVI)
Retraitement	Marcoule	63 (38 - 91)	6	42 (VII)
	La Hague	90 (30 - 170)	13	33 (VII)
Autres installations	Centre de Saclay	88 (64 - 140)	6	39 (V)
	Centre de la Manche	90 (60 - 140)	21	26 (III)
	Niveau de la mer	80 (50 - 150)	20	9 (XVI)
Hors installations	Altitude moyenne	90 (40 - 180)	53	9 (XVI)
	Sommets	140 (70 - 300)	9	9 (XVI)

* Cf. figure 1 et tableau I.

4.2. Irradiation totale gamma ambiante

Les résultats proviennent de nombreuses stations réparties sur l'ensemble du territoire (Fig. 2). Les mesures sont réalisées soit, *in situ* à l'aide de balises qui délivrent une information permanente, soit par des dosimètres thermoluminescents renouvelés périodiquement.

À titre indicatif, le réseau TELERAY comporte 152 stations équipées de balises. Par ailleurs, chacun des sites nucléaires français importants dispose de 5 à 40 stations de mesure dotées de balises et/ou de dosimètres (OPRI, 1997).

Les niveaux d'irradiation présentés (Tab. V) correspondent en chaque station à la somme des irradiations dues aux rayonnements cosmique et tellurique.

Les valeurs d'irradiation les plus élevées sont logiquement observées dans les stations implantées sur des sommets et dans les régions granitiques telles que le nord-Limousin où, dans les deux situations, la valeur moyenne observée est de

140 nGy h⁻¹. Ces résultats traduisent l'influence de l'altitude sur l'accroissement de la composante d'origine cosmique dans le cas des mesures faites sur les sommets (Fig. 1), et celle des roches granitiques sur l'accroissement de la composante d'origine tellurique dans le cas du Limousin.

En règle générale, c'est la composante tellurique qui contribue de façon prépondérante à l'irradiation gamma totale ambiante comme le montrent les résultats issus des 20 stations en bord de mer gérées par l'OPRI : compte tenu d'une irradiation cosmique moyenne de 31 nGy h⁻¹ à cette altitude, la composante tellurique peut être estimée à 49 nGy h⁻¹ avec des valeurs susceptibles de fluctuer entre 19 et 119 nGy h⁻¹.

Lorsque la radioactivité naturelle des sols est connue, il est possible d'évaluer le débit de dose de la composante tellurique²⁰ et par soustraction de cette valeur à l'irradiation totale mesurée²¹, d'en déduire la contribution due au seul rayonnement cosmique. À titre d'exemple, pour le site de Saclay, ce calcul conduit à une irradiation d'origine tellurique estimée à 54 nGy h⁻¹ pour une irradiation totale moyenne de 88 nGy h⁻¹ d'où une contribution de la composante cosmique de 34 nGy h⁻¹. Il en résulte des doses annuelles sensiblement équivalentes associées à ces deux sources naturelles pour un individu séjournant 20 % de son temps à l'extérieur des bâtiments :

- irradiation tellurique : $54 \text{ nGy h}^{-1} \times 8\,760 \text{ h} \times 0,2 \times 0,7 \text{ Sv Gy}^{-1} = 66 \mu\text{Sv}$,
- irradiation cosmique : $34 \text{ nGy h}^{-1} \times 8\,760 \text{ h} \times 0,2 \times 1 \text{ Sv Gy}^{-1} = 60 \mu\text{Sv}$.

Les valeurs moyennes françaises sont comparables aux valeurs mondiales. Ainsi, à partir des analyses effectuées sur les sols récoltés dans l'environnement immédiat des 21 sites électronucléaires français (Tab. VI), l'irradiation tellurique naturelle peut être estimée à 58 nGy h⁻¹, valeur identique à la moyenne mondiale pondérée proposée par l'UNSCEAR (1988, 1993).

Dans l'évaluation des irradiations externes et des doses annuelles qui y sont associées, chaque site doit être considéré en tenant compte de ses particularités. Ainsi, l'irradiation tellurique naturelle calculée sur des plages proches de l'usine de La Hague n'atteint que 24 nGy h⁻¹, compte tenu de la radioactivité naturelle

²⁰ Des coefficients de 0,0417, 0,463 et 0,604 nGy h⁻¹/Bq kg⁻¹ sont proposés par Saito (Saito et Jacob, 1995) pour évaluer le rayonnement tellurique à partir des concentrations respectives en ⁴⁰K, ²³⁸U et ²³²Th présentes dans les sols.

²¹ En France, les radionucléides artificiels émetteurs gamma présents dans les sols et les sédiments ont en général une activité marginale par rapport à celles imputables aux radionucléides naturels.

²² Valeur moyenne du coefficient de conversion de dose retenu pour des adultes pour le rayonnement d'origine tellurique (UNSCEAR, 1988, 1993).

²³ Coefficient de conversion pris égal à l'unité compte tenu de la dominance des muons dans le rayonnement cosmique au niveau du sol (UNSCEAR, 1988, 1993).

TABLEAU VI

Radioactivité naturelle des sols en France ($\text{Bq kg}^{-1} \text{ sec}$)* niveaux non perturbés par l'action de l'homme (notations : cf. Fig. 1 et Tab. I).

Natural radioactivity of soil in France ($\text{Bq kg}^{-1} \text{ dry weight}$)*. Levels free from human interference (notations: cf. Fig. 1 and Tab. I).

Isotope mesuré	Zone de prélèvement				
	Amont du cycle	Centrales nucléaires	Usines de retraitement (▲)	Autres sites nucléaires (○)	Hors installations nucléaires (+)
^{40}K		526 124 - 1120	429 416 - 441	386 281 - 460	450 250 - 890
		XIV / 95 / a / 21	XIV / 5 / a / 5	V / 6 / s / 27	XVI / 7 / s / 39
		3,5 1,3 - 6,1		4 < 2,6 - 5,7	11 6 - 20
^{238}U		XIV / 95 / a / 21		V / 6 / s / 27	XVI / 7 / s / 39
	98 25 - 173				
	II / 7 / a / 4				
^{234}Pa		15 (36 - 70)	39 (26 - 50)		
		XIV / 95 / a / 21	XIV / 5 / a / 5		
		33 (15 - 54)	< 54		
^{234}Th		XIV / 95 / a / 21			
	90 25 - 160			43 26 - 67	
	II / 7 / a / 4			V / 6 / s / 27	
^{222}Rn	18 - 420			2 - 46	
	XIV / 3 /			XIV / 1 /	
	(Robé <i>et al.</i> , 1992)			(Robé <i>et al.</i> , 1992)	
kBq m^{-3}				27 21 - 34	35 13 - 67
				V / 6 / s / 27	XVI / 7 / s / 39
^{214}Bi					
	94 50 - 150	43 34 - 52			
	II / 7 / a / 4	XIV / 95 / a / 21			
^{214}Pb					
^{232}Th					
		36 4 - 92	45 41 - 48	35 26 - 43	
		XIV / 95 / a / 21		V / 6 / s / 27	
^{228}Ac					
^{212}Pb					

* sauf ^{222}Rn , (▲) Marcoule, (○) Saclay, (+) Stations de référence OPRI en milieu rural.

assez faible présente dans les sédiments marins sableux présents sur l'estran (Tab. VIII) que cette estimation soit faite à partir des résultats de mesures effectuées par la Marine nationale ou par l'ACRO. Le calcul des doses doit enfin s'appuyer sur la connaissance du mode de vie des populations locales. Ainsi un adulte qui effectuerait quotidiennement une promenade d'une heure sur ces plages recevrait une dose annuelle due à la composante tellurique naturelle de $6 \mu\text{Sv}$ ²⁴ et de $12 \mu\text{Sv}$ ²⁵ liée au rayonnement cosmique.

4.3. Radioactivité naturelle des sols et des sédiments

Les sols et les sédiments qui résultent de l'altération des roches sous l'effet du climat constituent la source de radioactivité naturelle à laquelle se trouve le plus directement exposé l'homme (Tabs. VI-VIII). Leurs teneurs en radioéléments naturels déterminent l'importance de l'irradiation externe d'origine tellurique. Mais leurs caractéristiques radioactives et pédologiques vont aussi conditionner l'importance des transferts des radionucléides depuis le sol ou les sédiments, vers l'atmosphère (exhalation du radon, remise en suspension de particules radioactives), les végétaux terrestres cultivés, les bioindicateurs mais également influencer le taux de lessivage des radionucléides par les eaux de ruissellement.

Le ^{40}K est, quel que soit le site et le type de prélèvement, l'isotope radioactif naturel le plus abondant : sa concentration, de 350 à 600 Bq kg⁻¹ sec (Gontier, 1998), dépasse en général d'un facteur 10 ou plus celles de tous les autres isotopes naturels appartenant aux familles de ^{238}U ou du ^{232}Th qui se situent en général entre 10 et 50 Bq kg⁻¹ sec. Toutefois, dans les zones uranifères, en particulier dans les sols, les concentrations des isotopes de la famille de ^{238}U sont environ deux fois supérieures à celles habituellement observées dans les autres zones. Cette différence se traduit aussi au niveau des activités en ^{222}Rn dans les pores des sols des régions granitiques où elles peuvent varier entre 18 et 420 kBq m⁻³ ce qui correspond à des concentrations 10 fois supérieures à celles observées dans des zones sédimentaires telles que le Bassin parisien (Robé *et al.*, 1992b).

Dans une même région géographique, les concentrations en isotopes naturels vont en outre varier en fonction de la granulométrie des matériaux prélevés. L'abondance de particules fines dans un sol ou un sédiment se traduit en général par des concentrations plus élevées comme le montrent les activités des vases récoltées dans la rade de Cherbourg par rapport aux sédiments sableux récoltés sur les plages du nord-Contentin (Schmidt *et al.*, 1998).

²⁴ $365 \text{ J} \times 1 \text{ h j}^{-1} \times 24 \text{ nGy h}^{-1} \times 0,7 \text{ Sv Gy}^{-1} = 6 \mu\text{Sv}$.

²⁵ $365 \text{ J} \times 1 \text{ h j}^{-1} \times 32 \text{ nGy h}^{-1} \times 1 \text{ Sv Gy}^{-1} = 12 \mu\text{Sv}$.

TABLEAU VII

Radioactivité naturelle des sédiments d'eau douce en France ($\text{Bq kg}^{-1} \text{ sec}$) niveaux non perturbés par l'action de l'homme (notations : cf. Fig. 1 et Tab. I).

Natural radioactivity of freshwater sediments in France ($\text{Bq kg}^{-1} \text{ dry}$). Levels free from human interference (notations: cf. Fig. 1 and Tab. I).

Isotope mesuré	Zone de prélèvement				
	Amont du cycle	Centrales nucléaires	Usines de retraitement (▲)	Autres sites nucléaires (○)	Hors installations nucléaires (●)
^{40}K		627 73 - 1160 XIV / 56 / a / 23	449 376 - 589 VII / 4 / m / 29	357 170 - 500 V / 12 / a / 28	395 299 - 451 XIV / 4 / a / 6
^7Be		36 3 - 169 XIV / 56 / a / 23	< 13,8 (< 4,8 - 39) VII / 4 / m / 29	4 (< 2,3 - < 5,3) V / 12 / a / 28	8 5 - 12 XIV / 4 / a / 6
^{238}U	48 18 - 74 II / 5 / a / 19				
^{234}Pa		42 23 - 66 XIV / 56 / a / 23	37 29 - 54 XIV / 17 / a / 20		31 21 - 43 XIV / 4 / a / 6
^{226}Ra	49 40 - 60 II / 5 / a / 19			40 5 - 63 V / 12 / a / 28	
^{214}Bi				30 4,7 - 69 V / 12 / a / 28	
^{214}Pb				29 5,2 - 40 V / 12 / a / 28	
^{210}Pb	97 50 - 160 II / 5 / a / 19			50 1,7 - 76 V / 12 / a / 28	
^{228}Ac		34 8 - 59 XIV / 56 / a / 23	29 13 - 35 XIV / 17 / a / 20	32 4,6 - 50 V / 12 / a / 28	< 45 XIV / 4 / a / 6
^{212}Pb				33 6,1 - 52 V / 12 / a / 28	

(▲) Marcoule, (○) Saclay, (●) Stations observatoires IRSN.

TABLEAU VIII

Radioactivité naturelle des sédiments marins en France (Bq kg⁻¹ sec) niveaux non perturbés par l'action de l'homme (notations : cf. Fig. 1 et Tab. I).

Natural radioactivity of marine sediments in France (Bq kg⁻¹ dry). Levels free from human interference (notations: cf. Fig. 1 and Tab. I).

Isotope mesuré	Zone de prélèvement				
	Amont du cycle (○)	Centrales nucléaires (▼)	Usines de traitement (✓)	Autres sites nucléaires (●)	Hors installations nucléaires (×)
⁴⁰ K	210 175 - 300 XVI / 4 / s / 13	29 - 420 XIV / 4 / a / 8	342 250 - 416 XV / 4 / v /	462 402 - 506 XV / 5 / m / 34	515 428 - 640 XIV / 2 / t / 16
⁷ Be		3,4 - 46 XIV / 4 / a / 8		20 12 - 24 XV / 5 / m / 34	13 < 4 - 44 XIV / 2 / t / 16
²³⁸ U	< 25 XVI / 4 / s / 13				
²³⁴ Th		18 6,3 - 17 1 / 2 / s / 1			
²²⁶ Ra	6,6 4,6 - 8,2 XVI / 4 / s / 13	30 19 - 41 1 / 2 / s / 1			
²¹⁴ Bi		46 - 35 XIV / 4 / a / 8	7,6 5,8 - 9,1 XV / 4 / v /	16 15 - 18 XV / 5 / m / 34	
²¹⁴ Pb		12 7,8 - 17 1 / 2 / s / 1	8 6,2 - 9,9 XV / 4 / v /	17 16 - 18 XV / 5 / m / 34	
²³² Th	15 7,3 - 21 XVI / 4 / s / 13				
²²⁸ Ra	10 5,7 - 20 XVI / 4 / s / 13				
²²⁸ Ac		3,0 - 14 XIV / 4 / a / 8	9,3 7,2 - 12 XV / 4 / v /	19 18 - 22 XV / 5 / m / 34	34 20 - 91 XIV / 2 / t / 16

(○) La Hague - Sables sur l'estran, (▼) Centrales bord de mer EDF, (○) Baie de Seine, (×) Observatoire marin en Méditerranée, (●) Rade de Cherbourg.

Enfin, le bruit de fond naturel dû aux isotopes des familles de l'uranium et du thorium peut être perturbé par diverses activités humaines. Si celles-ci augmentent de façon significative les concentrations en radioéléments naturels sur un site, la mise en évidence d'une pratique peut être aisée²⁶. Mais en règle générale, pour les installations de l'amont du cycle du combustible où se réalisent des opérations d'extraction du minerai, de séparation $^{238}\text{U}/^{226}\text{Ra}$ et de stockage des déchets riches en ^{226}Ra et ses descendants, cette mise en évidence peut s'avérer délicate, notamment en milieu terrestre (Bernhard *et al.*, 1995). Il est en effet indispensable d'identifier des stations de référence où l'action de l'homme n'a pas introduit de perturbation, pour pouvoir évaluer l'impact additionnel que peuvent induire ces différentes pratiques.

Les données recueillies montrent toutefois que l'effort d'échantillonnage ne porte pas préférentiellement sur les sols et les sédiments émergés dont la connaissance est pourtant prioritaire pour l'évaluation des transferts et des doses. Sur le plan analytique, les mesurages entrepris ne permettent pas toujours d'identifier systématiquement les trois radioéléments telluriques essentiels (^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th) ainsi que leurs descendants à vie longue (^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{210}Pb) ou les radionucléides émetteurs gamma responsables du rayonnement tellurique (^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{212}Pb). La connaissance des rapports des activités de ces isotopes constitue autant d'indices pour évaluer l'impact d'une pratique. Ainsi le rapport $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ varie entre 0,4 et 10 dans les roches alors que dans les rejets des mines françaises, il se caractérise par une valeur supérieure à 100 (Zettwoog *et al.*, 1997).

4.4. Radioactivité naturelle de l'atmosphère

La source principale d'irradiation naturelle des populations est liée à la présence des descendants émetteurs alpha à vie courte du radon (Tab. IX) (Renoux, 1984). Par exemple, sur le site de Saclay, les doses annuelles²⁷ liées à l'inhalation des radioéléments naturels peuvent être estimées à 120 μSv pour le ^{222}Rn ²⁸ et 6 μSv pour le ^{210}Pb ²⁹. Elles sont très inférieures pour le ^7Be (0,2 nSv), le ^{40}K (0,04 nSv) et le ^{22}Na (0,001 nSv). La mesure de l'énergie alpha potentielle (EAP) sur certains sites permet d'aboutir à une évaluation plus précise des doses respectives dues aux descendants du radon par la mesure de ces derniers. La nouvelle directive européenne (JOCE, 1996) fait explicitement référence aux mesures d'EAP pour

²⁶ Les mesures réalisées par l'ACRO à St-Nicolas d'Aliermont par exemple (ancienne usine manipulant du radium) donnent des teneurs maximales en ^{226}Ra dans les sols de l'ordre de 150 000 Bq kg⁻¹.

²⁷ Les doses efficaces calculées dans ce paragraphe correspondent au cas d'un adulte en activité (débit respiratoire 1,2 m³ h⁻¹).

²⁸ Pour le ^{222}Rn facteur de conversion de dose retenu : 6 nSv/Bq h m⁻³ avec un coefficient d'équilibre de 0,6 avec ses descendants (JOCE, 1996) 19 Bq m⁻³ $\times$ 8 760 h $\times$ 0,2 $\times$ 0,6 $\times$ 6 nSv/Bq h m⁻³.

²⁹ 498 $\times$ 10⁻⁶ Bq m⁻³ $\times$ 8 760 h $\times$ 0,2 $\times$ 1,2 m³ h⁻¹ $\times$ 5,6 $\times$ 10⁻⁶ Sv/Bq (Tab. III).

TABLEAU IX

Radioactivité naturelle de l'atmosphère en France, niveaux non perturbés par l'action de l'homme (notations : cf. Fig. 1 et Tab. I).

Natural radioactivity of atmosphere in France. Levels free from human interference (notations: cf. Fig. 1 and Tab. I).

Constituant ou composante	Paramètre mesuré (unité)	Zone de prélèvement				
		Amont du cycle	Centrales nucléaires	Usines de retraitement (▼)	Autres sites nucléaires (+)	Hors installations nucléaires
^{222}Rn						36 (26 - 56) (●)
gaz	(Bq m ⁻³)					III / 6 / P / m / 3
Equivalent				63 8 - 253	19 5 - 44	
^{222}Rn	(Bq m ⁻³)			VII / 2 / c / 9	V / 6 / c / 39	
Aérosols desc. α	EAP	74 23 - 196				31 (13 - 68) (●)
^{222}Rn	(nJ m ⁻³)	II / 13 / m / 9				III / 6 / m / 3
Aérosols desc. α	EAP	16 10 - 20				20 (10 - 51) (●)
^{222}Rn	(nJ m ⁻³)	II / 13 / m / 9				III / 6 / m / 3
Aérosols	^7Be		3,7 1,2 - 13	5,2 1,7 - 15	3,4 1,6 - 7,1	3,1 1 - 7 (×)
	(mBq m ⁻³)		XVI / 21 / q / 20	VII / 6 / j / 14	XIV / 1 / dc / 39	XIV / 3 / dc
Aérosols	^{40}K				9 5 - 19	9 4 - 29 (×)
	(μBq m ⁻³)				XIV / 1 / dc / 26	XIV / 3 / dc / 30
Aérosols	^{22}Na				0,42 0,15 - 0,7	0,39 0,01 - 0,83 (×)
	(μBq m ⁻³)				XIV / 1 / dc / 26	XIV / 3 / dc / 30
Aérosols	^{210}Pb				441 76 - 1455	498 58 - 2000 (×)
	(μBq m ⁻³)				XIV / 1 / dc / 5	XIV / 3 / dc / 30
Vapeur d'eau	^3H			P	< 0,8	
	(Bq m ⁻³)			VII / 6 / h / 36	III / 2 / h / 7	

(●) Site dans l'est de la France du futur laboratoire souterrain de l'ANDRA (mesure d'1/2 heure de jour et de nuit). (+) Site de Saclay. (×) Station observatoire atmosphérique de l'IRSN (Flers - Charleville - Dijon). (▼) Marcoule. EAP : Energie alpha potentielle.

l'estimation des doses liées aux descendants des ^{222}Rn et ^{220}Rn . Dans le cas du site Est de la France destiné à accueillir le futur laboratoire souterrain de l'ANDRA (1998), un calcul effectué à partir de la mesure du ^{222}Rn conduit à une dose de $230\ \mu\text{Sv}$, alors qu'en se basant sur les mesures d'EAP, les contributions respectives des descendants du ^{222}Rn et ^{220}Rn peuvent être estimées respectivement à 60^{30} et $18\ \mu\text{Sv}^{31}$.

En dépit de la prédominance des doses par inhalation dues aux descendants du radon, la mesure de ces derniers est loin d'être systématique, sauf dans le cas des sites miniers où sa connaissance au niveau du bruit de fond naturel et des zones soumises à l'impact des travaux miniers est indispensable.

On notera également l'absence de données sur les activités volumiques de l'air en ^{232}Th dont le coefficient de dose par inhalation est pourtant parmi les plus pénalisants (Tab. III).

4.5. Radioactivité naturelle des aliments

4.5.1. Boissons

L'activité en tritium dans les eaux, liée à sa seule production naturelle correspond à des concentrations qui se situent entre $0,12$ à $0,24\ \text{Bq l}^{-1}$ (AIEA, 1992). Or, la plupart des concentrations mesurées dépassent cette valeur même parfois pour des stations éloignées d'installations nucléaires (Foulquier et Pally, 1982). La mobilité du tritium dans l'environnement, la contribution résiduelle des retombées dues aux explosions d'engins nucléaires dans l'atmosphère mais surtout la multiplicité des rejets liquides et gazeux de cet isotope de l'hydrogène qui suit les mouvements de l'eau, explique sa présence dans des eaux potables provenant de ressources en liaison directe ou non avec l'atmosphère (Rémy et Pellerin, 1968 ; Rémy et Lemaître, 1990). Des valeurs de plusieurs dizaines de Bq l^{-1} sont parfois observées³². Les mesures réalisées sur les eaux brutes superficielles ou de nappe (Tab. X) constituent un indicateur du niveau probable de pollution de l'eau potable pour cet isotope vis-à-vis duquel les traitements d'eau sont sans effet³³.

En ce qui concerne le ^{40}K et ^{238}U , les concentrations mesurées dans des eaux potables prélevées dans des zones dépourvues d'installations nucléaires conduisent à des doses par ingestion de respectivement de $0,5$ et $0,3\ \mu\text{Sv}$.

³⁰ $31\ \text{nJ m}^{-3} \times 8\ 760\ \text{h} \times 0,2 \times 1,1\ \text{Sv/Bq h m}^{-3} = 60\ \mu\text{Sv}$.

³¹ $20\ \text{nJ m}^{-3} \times 8\ 760\ \text{h} \times 0,2 \times 0,5\ \text{Sv/Bq h m}^{-3} = 18\ \mu\text{Sv}$, cf. directive 96/29 (Jammet, 1984).

³² Les mesures réalisées par exemple en Seine en aval de la centrale de Nogent indiquent des concentrations en ^3H qui peuvent atteindre $60\ \text{Bq l}^{-1}$ en période estivale. En prenant en compte cette valeur et une consommation d'eau de 2 litres par jour, on aboutit à une dose annuelle maximale de $365\ \text{j} \times 2\ \text{l/j} \times 60\ \text{Bq/l} \times 0,018 \times 10^{-9}\ \text{Sv/Bq} = 0,8\ \mu\text{Sv}$.

³³ Le tritium, isotope de l'hydrogène, est un des constituants de la molécule d'eau (H_2O), contrairement aux autres isotopes présents sous forme dissoute ou associée aux suspensions dans les eaux brutes.

TABEAU X
Radioactivité naturelle de diverses boissons en France (Bq l⁻¹), niveaux non perturbés par l'action de l'homme
 (notations : cf. Fig. 1 et Tab. I).
Natural radioactivity of various beverages in France (Bq l⁻¹). Levels free from human interference (notations:
cf. Fig. 1 and Tab. I).

Constituant ou composante	Isotope mesuré	Zone de prélèvement					
		Amont du cycle	Centrales nucléaires	Usines de retraitement	Autres sites nucléaires	Hors installations nucléaires	
Eaux potables	⁴⁰ K	71 < 31 - 290 XVI / 6 / v / 4		0,085 0,008 - 0,24 (●) VII / 5 / m / 4	0,042 < 0,031 - 0,12 (x) XVI / 4 / v /	0,1 0,031 - 0,46 XVI / 15 / v / 33	
	³ H				p (x) XVI / 4 / v /	< 25 < 8 - 19 XVI / 15 / v / 33	
	²³⁸ U	0,054 < 0,006 - 1,4 XVI / 6 / v / 4		(1) 0,0175 < 0,003 - 0,037 (●) VII / 5 / m / 4	0,01 < 0,006 - 0,019 (x) XVI / 4 / v /	0,01 < 0,006 - 0,016 XVI / 15 / v / 33	
	²²⁶ Ra	< 0,038 XVI / 6 / v / 4			< 0,028 (x) XVI / 4 / v /	< 0,035 XVI / 15 / v / 33	
	²²² Rn					85 < 9 - 1100 (○) XVI / 155 / v / 1	
	Eaux minérales	⁴⁰ K					3040 < 3,1 - 4300 XVI / 75 / v / 36
²³⁸ U						0,167 0,002 - 1,4 XVI / 75 / v / 36	
²²⁶ Ra						0,27 < 0,03 - 2,3 XVI / 75 / v / 36	
²²² Rn						58 < 8,5 - 680 (○) XVI / 75 / v / 36	
Lait		⁴⁰ K		48 28 - 58 XVI / 19 / a / 20 *	44 36 - 59 (●) VII / 1 / m / 39	47 41 - 53 (■) V / 1 / m /	48 37 - 68 XVI / 104 / v /
		⁷ Be				< 0,26 < 0,23 - < 0,27 (■) V / 1 / m /	
	²¹⁰ Pb	0,4 II / 1 / a / 4			< 1 < 0,8 - < 1,2 (■) V / 1 / m / 19		
	³ H			p (+) XVI / 5 / v /			
Vins cidres	⁴⁰ K			35 29 - 50 VII / 7 / a / 13		38 10 - 99 XII / 30 / a / 13	
Jus de fruits							

* Valeur moyenne, (●) Marcoul, (+) La Hague, (■) Saclay, (O) mesures réalisées en sortie de captage, (x) Valduc, (1) dosage en uranium total (238+235+234 U).

Dans le cas de l'amont du cycle au niveau de ^{238}U , la consommation d'eau au niveau des stations de référence conduit à une dose annuelle de $2\ \mu\text{Sv}$, celle associée aux ^{226}Ra pouvant atteindre $8\ \mu\text{Sv}$.

En ce qui concerne le lait, sur la base des données disponibles et d'une consommation moyenne annuelle en lait frais de 64 litres (Guerere *et al.*, 1989), la dose annuelle due au ^{40}K est de $19\ \mu\text{Sv}$. Le seul résultat disponible en ^{210}Pb permet d'estimer sa contribution à $18\ \mu\text{Sv}$ dans le contexte d'une station de référence d'un site minier. Enfin, pour le tritium, quand les mesures sont disponibles comme dans l'environnement du site de retraitement des combustibles usés de La Hague, l'impact de l'installation est évident, la contribution à la dose annuelle atteignant moins d'un μSv ³⁴.

4.5.2. Fruits et légumes

Les données disponibles pour les légumes feuilles permettent de comparer l'impact lié à la consommation annuelle de ces denrées³⁵ pour différents isotopes naturels (Tabs. XI et XII). Les doses annuelles associées aux activités présentes dans ces denrées dans l'environnement des centrales françaises sont les suivantes :

$$^{40}\text{K} = 35\ \mu\text{Sv}, \quad ^{210}\text{Pb} = 25\ \mu\text{Sv}, \quad ^{238}\text{U} < 2\ \mu\text{Sv}, \\ ^{222}\text{Th} = 0,7\ \mu\text{Sv} \quad \text{et} \quad ^7\text{Be} = 0,007\ \mu\text{Sv}.$$

Les résultats obtenus au niveau des stations de référence des sites miniers sont comparables aux données recueillies dans les autres zones, les activités de ^{226}Ra disponibles permettant d'évaluer sa contribution dosimétrique à $6\ \mu\text{Sv}$.

Les données sur les autres catégories de légumes ou fruits dont les consommations annuelles sont au moins aussi importantes³⁶ apparaissent moins bien renseignées.

Le nombre de résultats de mesure pour les isotopes naturels les plus importants sur le plan dosimétrique est souvent limité, sauf dans le cas des zones minières où les dosages effectués sur les stations de référence permettent d'évaluer les doses annuelles associées :

$$^{210}\text{Pb} = 51\ \mu\text{Sv}, \quad ^{226}\text{Ra} = 6\ \mu\text{Sv}, \quad ^{238}\text{U} = 1\ \mu\text{Sv}.$$

Pour d'autres productions telles que les céréales³⁷ les données disponibles se limitent au seul ^{40}K .

³⁴ $730\ \text{l/an} \times 45\ \text{Bq/l} \times 0,018 \times 10^{-9}\ \text{Sv/Bq} = 0,6\ \mu\text{Sv/an}$.

³⁵ $46\ \text{kg par an}$ (Guerere *et al.*, 1989).

³⁶ $64\ \text{kg an}^{-1}$ pour les légumes racines et $74\ \text{kg an}^{-1}$ pour les fruits (Guerere *et al.*, 1989).

³⁷ $47\ \text{kg an}^{-1}$ pour le pain par exemple.

TABLEAU XI

Radioactivité naturelle des légumes en France (Bq kg⁻¹ frais), niveaux non perturbés par l'action de l'homme (notations : cf. Fig. 1 et Tab. I) .

Natural radioactivity of vegetables in France (Bq kg⁻¹ fresh weight). Levels free from human interference (notations: cf. Fig. 1 and Tab. I) .

Constituant ou composante	Isotope mesuré	Zone de prélèvement				
		Amont du cycle	Centrales nucléaires	Usines de retraitement (●)	Autres sites nucléaires	Hors installations nucléaires (x)
Légumes feuilles	⁴⁰ K		150 26 - 252	122 71 - 214	161 76 - 280 (○)	158 112 - 237
			XIV / 26 / a / 23	VII / 2 / a / 29	V / 9 / a / 29	XIV / 10 / a / 6
	⁷ Be		5,3 0,9 - 15	< 8,4 < 0,4 - 20	3,7 < 0,35 - 16 (○)	56 1 - 20
			XIV / 26 / a / 23	VII / 2 / a / 29	V / 9 / a / 29	XIV / 10 / a / 6
	²³⁸ U	0,6 0,2 - 1,5	< 0,8			
		II / 5 / a / 4	XIV / 26 / a / 23			
	²²⁶ Ra	0,45 0,2 - 1				
		II / 5 / a / 4				
²¹⁰ Pb	0,46 0,3 - 0,7	0,8 0,3 - 1,7		2,3 0,6 - < 4,4 (○)	0,7 0,6 - 0,8	
	II / 5 / a / 4	XIV / 26 / a / 23		V / 9 / a / 29	XIV / 10 / a / 6	
²²⁸ Ac		0,07 0 - 0,6			0,08 0 - 0,37	
		XIV / 26 / a / 23			XIV / 10 / a / 6	
Légumes racines	⁴⁰ K			102 52 - 170	100 40 - 180 (□)	105 (▼) 48 - 185
				VII / 3 / s / -	V / 1 / t /	XII / 38 / a / 13
	⁷ Be				< 0,5 < 0,2 - < 1,4 (□)	
					V / 1 / t /	
	²³⁸ U	0,75 0,1 - 1				
		II / 5 / a / 4				
	²²⁶ Ra	0,56 0,2 - 0,7				
		II / 5 / a / 4				
²¹⁰ Pb	0,7 0,4 - 1,1					
	II / 5 / a / 4					

(●) Marcoule, (x) Ecrins Mercantour, (○) Saclay, (▼) Moitié nord et centre de la France, (□) Cadarache.

TABLEAU XII

Radioactivité naturelle des fruits et de divers aliments en France (Bq kg⁻¹ frais), niveaux non perturbés par l'action de l'homme (notations : cf. Fig. 1 et Tab. I).

Natural radioactivity of fruit and various foodstuffs in France (Bq kg⁻¹ fresh weight). Levels free from human interference (notations: cf. Fig. 1 and Tab. I).

Constituant ou composante	Isotope mesuré	Zone de prélèvement				
		Amont du cycle	Centrales nucléaires	Usines de retraitement (x)	Autres sites nucléaires	Hors installations nucléaires
Fruits	⁴⁰ K		50 31 - 614 XIV / 15 / a / 19	56 28 - 96 VII / 2 / a / 29	81 50 - 110 (●) V / 3 / a /	
			1,2 0,3 - 6,3 XIV / 15 / a / 19	< 1,1 < 0,3 - 2,4 VII / 2 / a / 9	0,9 < 0,35 - 1,8 (●) V / 3 / a /	
		0,35 0,2 - 0,6 II / 4 / a / 4				
	²³⁸ U					
		0,3 0,2 - 0,6 II / 4 / a / 4				
	²²⁶ Ra					
		0,3 0,2 - 0,6 II / 4 / a / 4				
	²¹⁰ Pb		< 0,15 XIV / 15 / a / 19		< 1,3 < 1 - < 1,9 (●) V / 3 / a /	
		0,3 0,2 - 0,4 II / 4 / a / 4				
	²²⁸ Ac		0,002 0 - 0,036 XIV / 15 / a / 19			
Champignons	⁴⁰ K					121 55 - 204 (▼) XII / 23 / a / 13
Miel	⁴⁰ K					50 16 - 110 (▼) XII / 17 / a / 13
Céréales	⁴⁰ K		110 80 - 130 XVI / 32 / a / 23*	120 90 - 140 XVI / 2 / a / 23	130 100 - 160 XVI / 5 / a /	100 110 - 130 (○) XVI / 84 / a / 20
Viande (boeuf)	⁴⁰ K			118 100 - 150 XII / 1 / v / 4		
Viande (mouton)	⁴⁰ K			89 XII / 11 / v / 4		
Viande (veau)	⁴⁰ K			87 84 - 89 XII / 1 / v / 4		

* Valeur moyenne, (x) Marcoule, (▼) moitié nord et centre de la France, (●) Saclay, (○) en liaison avec l'ONIC.

Des variations de concentrations en isotopes naturels existent entre les différentes espèces végétales qu'il convient de prendre en compte notamment si l'une d'entre elles présente des niveaux d'activité élevés pour certains isotopes naturels et/ou si elle constitue un aliment de base de notre alimentation³⁸.

4.5.3. Poissons, mollusques et crustacés

Ces denrées constituent, comme les légumes et les fruits, des aliments pour lesquels le délai entre la récolte et la consommation est court, ce qui augmente la possibilité d'impact dosimétrique des isotopes naturels à vie courte tels que le ^{210}Po (période = 138 jours). Cet isotope présente en outre la particularité d'avoir le facteur de dose par ingestion le plus élevé³⁹ parmi les radioéléments naturels et d'être par ailleurs bien retenu par certaines espèces marines (crustacés et mollusques) consommées par l'homme (Germain *et al.*, 1992, 1995 ; Ryan *et al.*, 1997).

Pour les poissons d'eau douce, les teneurs en ^{238}U , ^{226}Ra et ^{210}Pb (Tab. XIII) semblent, pour les stations d'échantillonnage situées en amont des rejets des installations des mines d'uranium, légèrement supérieures aux valeurs observées dans l'environnement des centrales ou usines de retraitement⁴⁰. Les doses associées à une consommation annuelle de 5 kg de poissons frais sont les suivantes :

$$^{210}\text{Pb} = 4 \mu\text{Sv} ; \quad ^{40}\text{K} = 3 \mu\text{Sv} ; \quad ^{226}\text{Ra} = 2 \mu\text{Sv} ; \quad ^{238}\text{U} = 0,4 \mu\text{Sv}.$$

Pour les poissons marins, les données de l'IPSN issues des observatoires marins permettent d'estimer la contribution du ^{210}Po à 15 μSv par rapport à une contribution due au ^{40}K de 4 μSv .

Pour les crustacés ou les mollusques filtreurs comme les moules pour lesquels les teneurs en ^{210}Po sont élevées en raison des facteurs de concentration plus importants chez ces espèces, la dose annuelle pourrait atteindre 372 μSv ⁴¹.

Des données très ponctuelles existent sur le thorium. Par exemple une étude menée par l'OPRI à proximité de l'usine de la Rochelle sur des moules prélevées

³⁸ La consommation annuelle de pommes de terre représente à elle seule 54 kg an⁻¹ pour la catégorie des légumes racines.
³⁹ 1,2 μSv par Becquerel ingéré.

⁴⁰ Pour être plus affirmatif, il conviendrait de pouvoir comparer des espèces ayant le même mode d'alimentation et d'être certain que les échantillons mesurés dans chaque cas correspondaient uniquement à de la chair.

⁴¹ En supposant une consommation annuelle de 3 kg de crevettes et de 3 kg de moules :

moules 41 Bq kg⁻¹ frais $\times$ 3 kg an⁻¹ $\times$ 1,2 $\times 10^{-6}$ Sv Bq⁻¹ = 148 μSv ,

crevettes 62 Bq kg⁻¹ frais $\times$ 3 kg an⁻¹ $\times$ 1,2 $\times 10^{-6}$ Sv Bq⁻¹ = 224 μSv .

Il conviendrait pour une estimation plus précise d'évaluer l'effet de la cuisson sur les activités effectivement ingérées.

TABLEAU XIII

Radioactivité naturelle des poissons, mollusques et crustacés en France (Bq kg⁻¹ frais), niveaux non perturbés par l'action de l'homme (notations : cf. Fig. 1 et Tab. I).
 Natural radioactivity of fish, shellfish and crustaceans in France (Bq kg⁻¹ fresh weight). Levels free from human interference (notations: cf. Fig. 1 and Tab. I).

Constituant ou composante	Isotope mesuré	Zone de prélèvement				
		Amont du cycle	Centrales nucléaires	Usines de retraitement	Autres sites nucléaires	Hors installations nucléaires
Poissons d'eau douce	⁴⁰ K		101 (39 - 178) XIV / 89 / a / 20*	84 65 - 104 (●) VII / 3 / t / 39	73 40 - 105 (○) V / 2 / s / 19	
	⁷ Be		< 4		< 7,1 (< 3,8 - < 13) (○) V / 2 / s / 19	
	²³⁸ U	1,6 (■) II / 1 / a / 19		0,06 0,03 - 0,11 (●) XVI / 2 / s		
	²²⁶ Ra	1,7 (■) II / 1 / a / 19		0,32 0,15 - 0,49 (●) XVI / 2 / s /		
	²¹⁰ Pb	1,1 (■) II / 1 / a / 19	0,9 0 - 2,2 XIV / 89 / a / 20*		< 4,1 (< 2,8 - < 5,6) (○) V / 2 / s / 19	
	²²⁸ Ac		0,08 0 - 1,1 XIV / 89 / a / 20*			
Poissons marins	⁴⁰ K		104 77 - 210 XVI / 5 / a / 20*			124 108 - 137 (x) XIV / 2 / t / 6
	²¹⁰ Po					2,4 0,4 - 3,8 (x) XIV / 3 / a / 3
Mollusques marins (moules)	⁴⁰ K		150 - 470 XIV / 4 / a / 8	34 50 - 78 (●) VII / 1 / t / 19		67 30 - 107 (x) XIV / 5 / m / 6
	⁷ Be		16 - 20 XIV / 4 / a / 8			
	²²⁸ Ac		2 - 4 XIV / 4 / a / 8			
	²¹⁰ Po					41 10 - 76 (x) XIV / 5 / a / 2
Crustacés marins (crabes)	⁴⁰ K			61 (36 - 82) (★) VII / 2 / m / 33		
	²¹⁰ Po					62 47 - 112 (+) XIV / 2 / o / 3

* Valeur moyenne, (●) Marcoule, (○) Saclay, (■) Lodève, (x) Stations, (★) La Hague, (+) 2 stations Mont St Michel et Baie de Seine (Crevettes), (x) 3 stations en Manche + 2 en baie de Seine.

en 1989 conduit à des doses annuelles par ingestion dues à cette pratique de 8 μSv pour ^{232}Th , de 1,4 μSv pour ^{230}Th et de 2,3 μSv pour ^{228}Th ⁴².

4.6. Radioactivité naturelle des vecteurs et des bio-indicateurs

4.6.1. Eaux douces non-filtrées

Les eaux douces constituent, avec l'atmosphère, le vecteur essentiel de dispersion des éléments dans la biosphère. La connaissance de leur teneur en radioéléments naturels permet, au niveau des stations non perturbées par l'action de l'homme, d'apprécier la variabilité du bruit de fond naturel due aux paramètres (géologie et climatologie) qui agissent sur leur composition et la qualité radioactive de la ressource (Descamps et Foulquier, 1988). Les eaux douces superficielles ou souterraines sont en effet utilisées fréquemment pour l'alimentation en eau potable des populations ou pour l'irrigation (Tab. XIV).

4.6.2. Végétaux spontanés aquatiques et terrestres

Le volume de données disponibles est considérable (Tabs. XV et XVI) car les espèces végétales représentatives des milieux aquatiques ou terrestres sont en règle générale d'excellents bio-indicateurs des pollutions véhiculées par les masses d'eau ou d'air.

Quelques remarques générales sur les constituants qui n'entrent pas directement dans notre ration alimentaire sont présentées ci-dessous (Grauby *et al.*, 1984).

Des bioindicateurs comme les mousses aquatiques ou terrestres, les algues, les lichens (Daillant *et al.*, 1996), l'herbe, certaines espèces arbustives permettent de détecter l'impact des rejets d'une installation nucléaire alors que les mêmes mesures réalisées sur des constituants de l'environnement consommés par l'homme ne permettent pas toujours d'identifier la présence de radioéléments artificiels ou naturels exception faite des champignons.

Chez les végétaux terrestres, les radioéléments naturels prédominants sont le ^{40}K , en équilibre avec la teneur en potassium stable des espèces récoltées, et le ^7Be qui traduit l'intensité des dépôts secs ou humides récents en provenance de l'atmosphère.

⁴² Les moules prélevés dans une station influencée par les rejets de l'usine de La Rochelle montrent des niveaux en ^{232}Th , ^{230}Th et ^{228}Th de 15, 4, et 14 Bq kg^{-1} frais, à comparer avec des activités de 3,6, 1,8 et 3,2 Bq kg^{-1} respectivement mesurés sur des moules issues d'une station de référence. Consommation annuelle 3 kg de moules – impact de la pratique pour le ^{232}Th : $(15-3,6) \text{ Bq kg}^{-1} \text{ frais} \times 3 \text{ kg an}^{-1} \times 230 \times 10^{-9} \text{ Sv Bq}^{-1} \approx 8 \mu\text{Sv}$.

TABLEAU XIV

Radioactivité naturelle des eaux brutes en France (Bq l^{-1}), niveaux non perturbés par l'action de l'homme (notations : cf. Fig. 1 et Tab. I).
 Natural radioactivity of unprocessed waters in France (Bq l^{-1}). Levels free from human interference (notations: cf. Fig. 1 and Tab. I).

Constituant ou composante	Isotope mesuré	Zone de prélèvement				
		Amont du cycle	Centrales nucléaires	Usines de retraitement (+)	Autres sites nucléaires	Hors installations nucléaires
Eau de pluie	⁴⁰ K				0,03 0 - 0,57 (●) III / 2 / h / 9	P XVI / 23 / m / 38
	³ H		P VII / 20 / h / 20*	P VII / 6 / h / 29	P (●) XVI / 6 / m / 39	0,9 0,2 - 1,8 (×) IV / 2 / m / 3
	⁴⁰ K	0,21 < 0,03 - 1,0 XVI / 7 / m / 30	0,18 0,05 - 2,6 XVI / 26 / m / 20*	0,071 0,054 - 0,14 VII / 2 / h / 39	0,11 0,04 - 0,29 (●) III / 3 / m / h / 7	0,14 0,05 - 0,52 XVI / 9 / v / 33
Eaux douces superficielles	²³⁸ U	0,038 < 0,007 - 3,8 XVI / 7 / m / 30	< 0,012 0,006 - 0,028 XVI / 26 / m / 20*			0,016 0,008 - 0,028 XVI / 9 / u / 33
	²²⁶ Ra	0,02 < 0,02 - 0,05 II / 7 / m / 39	< 0,033 < 0,033 - 0,034 XVI / 26 / m / 20*			< 0,032 < 0,029 - 0,036 XVI / 9 / u / 33
	³ H		P XVI / 26 / m / 20*	P VII / 2 / h / 39	P VIII / 6 / m / 1	
	⁴⁰ K	0,9 0,5 - 1,5 XVI / 3 / s / 29		0,18 0,026 - 0,2 VII / 100 / m / 39	0,1 0 - 0,3 (●) III / 23 / v / 7	
Eaux douces souterraines	²³⁸ U	0,07 < 0,006 - 0,21 XVI / 3 / s / 29		0,044 0,025 - 0,064 VII / 4 / m / 4		
	²²⁶ Ra	0,075 < 0,032 - 0,14 XVI / 3 / s / 29				
	³ H		P XVI / 11 / s / 20*	P VII / 100 / m / 29	< 8,4 (●) III / 23 / v / 7	
	⁴⁰ K		P XVI / 3 / m / 11*	13 12 - 14 (○) VII / 10 / v / 39		
Eau de mer	³ H		P XVI / 3 / m / 11	P (○) XVI / 7 / m / 31		
	²³⁸ U		0,06 0,05 - 0,6 XVI / 3 / m / 11	0,075 0,06 - 0,09 (○) XVI / 2 / m / 28		
	²²⁶ Ra		< 0,03 XVI / 3 / m / 11			

* Valeur moyenne, (×) Orléans - Brest, (+) Marcoule, (○) La Hague, (●) site ANDRA de l'Aube.

TABLEAU XV

Radioactivité naturelle des végétaux terrestres spontanés en France ($\text{Bq kg}^{-1} \text{ sec}$), niveaux non perturbés par l'action de l'homme (notations : *cf.* Fig. 1 et Tab. I).

Natural radioactivity of spontaneous terrestrial plants in France (Bq kg^{-1} dry weight). Levels free from human interference (notations: *cf.* Fig. 1 and Tab. I).

Constituant ou composante	Isotope mesuré	Zone de prélèvement				
		Amont du cycle	Centrales nucléaires	Usines de retraitement	Autres sites nucléaires	Hors installations nucléaires
Herbe	^{40}K		490 214 - 1670 XIV / 19 / a / 23	133 33 - 260 (□) VII / 10 / m / 29	220 24 - 448 (×) V / 6 / m /	852 213 - 2168 XIV / 20 / a / 6
			183 10 - 550 XIV / 18 / a / 23	87 (4 - 427) (□) VII / 10 / m / 29	72 11 - 326 (×) V / 6 / m /	262 25 - 1064 XIV / 20 / a / 6
	^{228}Ac		3 0 - 21 XIV / 18 / a / 23			0,5 0 - 4,1 XIV / 20 / a / 6
			14 7,7 - 22 XIV / 18 / a / 23			
	^{210}Pb					
Autres végétaux	^{40}K		283 159 - 460 (○) XIV / 63 / a / 10	204 (187 - 218) (●) VII / 2 / s / 9	350 (+) 150 - 650 V / 2 / m /	122 102 - 152 (○) XIV / 10 / a / 6
			345 89 - 875 (○) XIV / 63 / a / 10	204 (187 - 218) (●) VII / 2 / s / 9	210 80 - 490 (+) V / 2 / m /	192 50 - 617 (○) XIV / 10 / a / 6
	^{238}U	2,7 (■) II / 1 / a		139 (110 - 187) (●) VII / 2 / s / 9		
	^{226}Ra	2,8 (■) II / 1 / a				
	^{214}Pb			< 1,5 < 1,3 - 2 (●) V / 2 / m / 9		
	^{210}Pb	3,8 (■) II / 1 / a /	268 97 - 589 (○) XIV / 63 / a / 10			498 391 - 603 (○) XIV / 10 / a / 6
	^{228}Ac					5,5 3 - 8,9 (○) XIV / 10 / a / 6
	^{212}Pb			1,5 1,1 - 1,9 (●) V / 2 / m / 9		

(■) Foin, (×) Fontenay-aux-Roses, (●) Thym à Marcoule, (□) Marcoule, (○) Mousses terrestres, (+) Thym à Cadarache.

TABLEAU XVI

Radioactivité naturelle des végétaux aquatiques spontanés en France (Bq kg⁻¹ sec), niveaux non perturbés par l'action de l'homme (notations : cf. Fig. 1 et Tab. I).

Natural radioactivity of spontaneous aquatic plants in France (Bq kg⁻¹ dry weight). Levels free from human interference (notations: cf. Fig. 1 and Tab. I).

Constituant ou composante	Isotope mesuré	Amont du cycle (■)	Zone de prélèvement			
			Centrales nucléaires	Usines de retraitement	Autres sites nucléaires	Hors installations nucléaires
Plantes d'eau douce	⁴⁰ K		990 331 - 1721 (●) XIV / 10 / a / 21	632 (267 - 1020) VII / 3 / t / 29	412 (×) 146 - 616 V / 1 / t /	1076 532 - 2007 (+) XIV / 7 / a / 20
			55 19 - 153 (●) XIV / 10 / a / 21	58 (20 - 98) VII / 3 / t / 29	101 (×) 52 - 174 V / 1 / t /	72 13 - 189 (+) XIV / 7 / a / 20
	²³⁸ U	0,8 0,4 - 2,2 (■) II / 6 / a / 19				
	²²⁶ Ra	1,8 0,4 - 3,7 (■) II / 6 / a / 19				
	²¹⁴ Pb			19,6 < 5,4 - 47 VII / 3 / t / 29		
	²¹⁰ Pb	3,2 0,3 - 7,5 (■) II / 6 / a /	24 12 - 42 (●) XIV / 10 / a / 21			21 16 - 29 (+) XIV / 7 / a / 20
Algues (Fucus)	²²⁸ Ac		33 3 - 170 (●) XIV / 10 / a / 21			20 0 - 57 (+) XIV / 7 / a / 20
	²¹² Pb			14 4,3 - 15 VII / 3 / t / 29		
	⁴⁰ K		1074 87 - 1800 (○) XIV / 4 / a / 8	522 - 1370 XIV / 2 / m / 25		1237 77 - 1990 (□) XIV / 5 / m / 6
	⁷ Be		5,8 - 22 (○) XIV / 4 / a / 8	26 9 - 31 XIV / 2 / m / 25		18 < 64 (□) XIV / 5 / m / 6
Algues (Fucus)	²¹⁴ Pb		16 - 19 (○) XIV / 4 / a / 8			
	²²⁸ Ac		9,2 2 - 10 (○) XIV / 4 / a / 8	5 - 12 XIV / 2 / m / 25		5,1 < 8 (□) XIV / 5 / m / 6
	²¹⁰ Po					11 4,7 - 22 XIV / 4 / a / 2

(■) roseaux ajoncs, (●) Centrales EDF continentales (mousses aquatiques), (×) Grenoble, (□) Observatoire marin, (○) Centrales EDF bord de mer, (+) stations à l'amont de tout rejet sur les cours d'eau (mousses aquatiques).

L'intérêt comme bio-indicateur des mousses terrestres est mis en évidence, par exemple, par leur teneur en ^{210}Pb pour des échantillons récoltés à proximité de centrales ($268 \text{ Bq kg}^{-1} \text{ sec}$) ou dans des zones dépourvues d'installations nucléaires ($498 \text{ Bq kg}^{-1} \text{ sec}$) alors que du foin récolté en zone uranifère ne présente qu'une activité de $4 \text{ Bq kg}^{-1} \text{ sec}$.

Pour les plantes aquatiques, la prédominance du ^{40}K est encore plus accentuée notamment chez les algues (Lambrechts *et al.*, 1992 ; Patti *et al.*, 1990). La réponse spécifique des espèces vis-à-vis de la rétention des radioéléments naturels est à nouveau illustrée par les écarts de concentration en ^{210}Pb d'un facteur 7 à 8 existant entre les roseaux et les ajoncs d'une part et les mousses aquatiques d'autre part.

Des différences de concentration pour un isotope naturel donné peuvent aussi apparaître entre deux espèces voisines de champignons (Calmet *et al.*, 1998b) ou d'algues. Une attention particulière doit donc être consacrée au choix des espèces végétales à échantillonner. À défaut, la variabilité du bruit de fond naturel et/ou l'impact additionnel dû à une pratique impliquant des isotopes naturels pourraient être mal appréciés.

4.7. Cas du carbone-14

En dépit du fait qu'il est le principal radioélément d'origine cosmique qui contribue aux doses délivrées aux populations, les données concernant le ^{14}C au voisinage des installations nucléaires françaises sont peu nombreuses. En outre, déterminer les concentrations caractérisant le bruit de fond naturel dans le but d'évaluer l'incidence d'une pratique impose de mesurer l'activité en ^{14}C contenu par kilogramme de carbone stable présent dans chaque échantillon. En effet, produit naturellement ou artificiellement, transformé en $^{14}\text{CO}_2$, il se mélange au gaz carbonique de l'air $^{12}\text{CO}_2$ et s'intègre au cycle biologique. Pour tout végétal en relation avec l'atmosphère, le bruit de fond naturel en ^{14}C (Fig. 4) se caractérise actuellement⁴³ par une activité de 226 Bq de ^{14}C par kilogramme de carbone. La contribution actuelle due aux anciennes explosions atomiques aériennes représentait en 1997 un apport supplémentaire de 25 à 30 Bq de ^{14}C par kilogramme de carbone stable (Fournier, 1998).

Un rejet artificiel en ^{14}C peut donc entraîner localement un dépassement de la valeur de $226 + (25 \text{ à } 30) = 251 \text{ à } 256 \text{ Bq}$ de ^{14}C par kilogramme de carbone stable qui caractérise en 1997 tout végétal en contact avec l'atmosphère. Par contre,

⁴³ Dans les années 60, cette teneur atteignait en France plus de 400 becquerel de ^{14}C par kilogramme de carbone du fait du nombre d'explosions d'engins nucléaires réalisées à cette époque dans l'atmosphère de l'hémisphère nord.

Figure 4 – Variation de la teneur en ^{14}C de végétaux chlorophylliens en Europe de l'ouest de 1958 à 1998.
 ^{14}C content variations in chlorophyll contents of plants of Western Europe from 1958 to 1998.

lorsque le végétal meurt et ne se met plus en équilibre à travers les processus de la photosynthèse avec l'atmosphère, sa teneur en ^{14}C par gramme de carbone décroît⁴⁴.

L'expression des résultats en Bq de ^{14}C exprimés en masse ou en volume, reste indispensable pour estimer les expositions sous la forme de doses. Parmi les différents radionucléides cosmogéniques, le carbone-14 est celui qui contribue le plus à la dose reçue par les populations. Sur la base d'une production annuelle de 1 PBq et une activité spécifique de 230 Bq kg^{-1} de carbone dans la matière organique vivante, la dose efficace annuelle est estimée à $12 \mu\text{Sv}$ (UNSCEAR, 1993).

Mais la connaissance des activités en ^{14}C exprimées par kilogramme de carbone stable d'un échantillon permet seule de savoir si, en tenant compte de l'origine de l'échantillon mesuré⁴⁵, son activité est le reflet du bruit de fond naturel ou si au contraire il traduit l'impact d'une pratique.

Ainsi, lors de la comparaison des résultats obtenus par les modèles avec ceux issus de mesures sur des échantillons de végétaux, prélevés dans l'environnement

⁴⁴ C'est le principe de la datation par le carbone-14.

⁴⁵ Pour des constituants de l'environnement dont la teneur en carbone n'est pas obligatoirement liée uniquement au CO_2 présent dans l'atmosphère (sols, sédiment, eaux, animaux), la valeur de $250\text{-}256 \text{ Bq de } ^{14}\text{C par kilogramme de carbone stable}$ ne peut servir de référence pour évaluer l'impact d'une pratique.

du plateau de La Hague entre 1996 et 1998, le Groupe radioécologie nord-Cotentin (GRNC) a relevé des activités de ^{14}C de l'ordre de 2 à 3 fois le bruit de fond naturel, comprises entre 500 et 900 Bq kg⁻¹ de carbone. Dans ce contexte et pour un scénario particulier, celui des « agriculteurs vivant à Pont Durand en 1996 », le GRNC a établi que le ^{14}C contribuerait à près du tiers de la dose efficace annuelle, soit 18 µSv sur 59 µSv (GRNC, 1999).

5. Conclusion

Cette enquête est la première de ce genre dans le domaine de la radioactivité naturelle de par son approche multipartenaires. Dix organismes publics et associations ont participé à ce travail collectif de synthèse des données initialement éparses (Annexe). Cette synthèse a permis de dresser un premier état des niveaux de radioactivité des principaux radionucléides artificiels en fonction des caractéristiques environnementales du territoire métropolitain. Ce travail mérite certainement d'être approfondi.

Les différences d'objectifs des organismes participants et donc les différences entre les approches et les méthodologies d'acquisition des données qui en résultent, sont limitantes pour une interprétation complète des niveaux d'activité.

Cette enquête montre la difficulté actuelle de dresser en France un bilan exhaustif des connaissances acquises concernant les caractéristiques du bruit de fond radioactif d'origine naturelle dans l'environnement. Or, la radioactivité naturelle constitue une des composantes essentielles de l'irradiation des populations. En outre, sans cette connaissance de base, il est impossible d'évaluer la part de l'impact des pratiques susceptibles de modifier la distribution des radioéléments d'origine tellurique ou cosmique dans notre environnement.

Il serait donc souhaitable que soit mise en place au niveau national une base de données informatisées tenant compte des résultats acquis actuels, de l'évolution de la réglementation (JOCE, 1996) et des réflexions en cours⁴⁶.

L'attente de cet objectif requiert de :

- sélectionner parmi les stations où sont réalisées actuellement des mesures, des stations de référence caractérisées par l'absence de toute modification des niveaux d'activités naturelles liée à une pratique,
- de disposer, à ces stations, de séries d'observations chronologiques à long terme afin d'apprécier au mieux la variabilité spatio-temporelle des rayonnements et des radionucléides d'origine naturelle,

⁴⁶ Document préparatoire « Exposures from natural sources » 48^e session de l'UNSCEAR. Vienne 12-16 Avril 1999.

- privilégier la mesure des rayonnements et des isotopes qui contribuent le plus aux doses délivrées aux populations en raison de leurs caractéristiques propres, du mode de vie des populations, et des pratiques actuelles ou passées,
- utiliser des protocoles communs d'échantillonnage, de conditionnement des échantillons, d'analyses et de traitement des résultats qui garantissent la validité des interprétations basées sur des données recueillies à des époques, en des lieux et sur des constituants différents,
- de confier à un organisme au niveau national la coordination des travaux entrepris par les différents intervenants et la gestion de la base de données proposée.

Une réelle amélioration de l'évaluation des risques liés aux applications de l'énergie nucléaire peut résulter d'une diversification des organismes effectuant des mesures et d'une multiplication des contrôles réalisés⁴⁷. Mais aujourd'hui en France, dans le domaine de la radioactivité naturelle, les efforts consentis manquent de coordination et d'orientations prioritaires.

À ce titre, les mesures des ^{238}U et ^{232}Th précurseurs des ^{226}Ra et ^{228}Ra , des descendants solides émetteurs alpha du radon (par la mesure des EAP du ^{222}Rn et ^{220}Rn), des émetteurs gamma post émanation (^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{212}Pb), du ^{210}Pb , ^{210}Po et du ^{14}C doivent être privilégiées.

Remerciements. Les rédacteurs expriment leurs remerciements à tous ceux qui ont participé à cette enquête en transmettant des données et qui n'apparaissent pas en tant que cosignataires de cette publication.

Annexe

Coordonnées des organismes effectuant des mesures de radioactivité dans l'environnement en France et publiant des informations sur les niveaux de radioactivité en France.

- **ALGADE**

1 avenue du Brugeaud, BP 46, 87250 Bessines-sur-Gartempe
tél. : 05.55.60.50.00, fax : 05.55.60.50.59
e-mail : algade@algade.com, site internet : www.algade.com
- Brochure Algade radioprotection et instrumentation.

⁴⁷ Actuellement, les données existantes sur la radioactivité naturelle dans l'environnement à l'extérieur des bâtiments représentent plusieurs millions d'informations.

- **ANDRA**

1-7 rue Jean Monnet, Parc de la Croix Blanche, 92298 Chatenay-Malabry Cedex

tél. : 01.46.11.80.00, fax : 01.46.11.81.00

site internet : www.andra.fr

- Plaquettes trimestrielles « Centre de la Manche – La surveillance de l’Environnement », Centre de l’Aube – La surveillance de l’Environnement »,
- Plaquette « Centre de la Manche »,
- Cassettes : « 25 ans d’histoire du Centre de la Manche », « Le Centre de l’Aube ».

- **Association pour le contrôle de la radioactivité dans l’ouest (ACRO)**

138 rue de l’Église, 14200 Hérouville St Clair

tél. : 02.31.94.35.34, fax : 02.31.94.85.31

site internet : www.acro.fr.st

- Revue trimestrielle « L’ACROnique du nucléaire ».

- **Groupe BRGM**

3 avenue Claude Guillemin, BP 6009, 45060 Orléans Cedex 2

tél. : 02.38.64.34.34, fax : 02.38.64.35.18

site internet : www.brgm.fr

- Plaquette Antea,
- Rapport BRGM R40465.

- **CEA/DCS/SHSP**

CEA/FAR, BP 6, 92265 Fontenay-aux-Roses Cedex

tél. 01.46.54.74.96, fax : 01.46.54.81.78

site internet : www.cea.fr

- « Contrôle des rejets et surveillance de l’environnement des centres CEA – Bilan annuel », Éditions 1996-1997-1998.

Sous la responsabilité des centres CEA :

- Établissement de Bruyères Le Châtel, plaquette mensuelle « surveillance de l’environnement »,
- CEA/Grenoble, plaquette mensuelle « Lettre d’information semestrielle de l’Environnement »,
- CEA/Cadarache, plaquette trimestrielle « Carte sur table » : bilan des rejets et de la surveillance de l’environnement »,
- CEA/Saclay, plaquette semestrielle « CEA/Saclay, l’environnement ».

- **CENTRE d'essais et de contrôle de la radioactivité**

CRECEP

1 voie de Bouvray, 94310 Orly

tél. : 01.48.90.93.87, fax : 01.48.90.50.61

- **CNRS/LSCE**

Domaine du CNRS, avenue de la Terrasse, 91198 Gif-sur-Yvette Cedex

tél. : 01.69.82.35.35, fax : 01.69.82.35.68

site internet : www.cnrs.fr

- **COGEMA/Branche uranium/Direction des opérations minières/SEPA**

BP 71, 87250 Bessines-sur-Gartempe

tél. : 05.55.76.64.40, fax : 05.55.76.64.59

site internet : www.cogema.fr

- La lettre de l'Ecarpière – édition semestrielle,
- La lettre de la Crouzille – édition trimestrielle,
- La lettre de Lodève – édition trimestrielle,
- La lettre du Forez – édition annuelle.

- **COGEMA La Hague**

50444 Beaumont-Hague Cedex

tél. : 02.33.02.62.02, fax : 02.33.02.76.07

- Rapport Environnement Cogema La Hague 1997,
- Plaqueette périodique surveillance de l'environnement.

- **COGEMA Marcoule**

BP 170, 30206 Bagnols-sur-Cèze Cedex

tél. : 04.66.79.53.45, fax. : 04.66.79.57.01

- Rapport Environnement Cogema, Marcoule 1997,
- Plaqueette mensuelle, Surveillance de l'environnement,
- Cassette « le contrôle de l'environnement d'un site nucléaire »,
COGEMA/CEA VALRHOSOCODEL.

- **CRII-RAD : Commission de recherche et information indépendantes sur la radioactivité**

471 avenue Victor Hugo, 26000 Valence

tél. : 04.75.41.82.50, fax : 04.75.81.26.48

e-mail : contact@criirad.com

- Revue trimestrielle « Le trait d'union »,

- Fiches thématiques : « La contamination des champignons », « Le radon »,
« Tchernobyl : contamination du territoire français ».

- **Direction générale de la concurrence, consommation et répression des fraudes (DGCCRF)**

* Ministère de l'économie et des finances et de l'industrie

59 boulevard Vincent Auriol, 75703 Paris Cedex 13

tél. : 01.44.97.30.74

* Laboratoire interrégional de la répression des fraudes de Lille

369 rue Jules Guesde, BP 39, 59651 Villeneuve Cedex

tél. : 03.20.79.95.95, Fax : 03.20.47.28.23

- Brochure Laboratoires 1997.

- **EDF/DEPT/DSRE**

6 rue Ampère, BP 114, 92203 Saint Denis Cedex 1

tél. : 01.43.69.31.27, fax : 01.43.69.45.71

site internet : www.edf.fr

36.14 : MAGNUC-SIM-EDFME

- Brochure « Nucléaire et Environnement » – Année 1997.

- **Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire**

Mission communication

tél. : 01.58.35.86.38, fax : 01.58.35.84.51

77-83 avenue du général de Gaulle, 92140 Clamart

BP 17, 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex

site internet : www.irsn.fr

- **Lyonnaise des eaux**

Centre international de recherches sur l'eau et l'environnement

38 rue du président Wilson, 78230 Le Pecq

tél. : 01.34.80.23.76, fax : 01.30.53.62.09

site internet : www.lyonnaise.des.eaux.fr

- Gestion station d'alerte sur la radioactivité des eaux de la Seine en aval de la Centrale de Nogent.

- **Marine nationale/Groupe d'études atomiques**

BP 34, 50115 Cherbourg naval

tél. : 02.33.92.65.97, fax : 02.33.94.24.00

- Plaquette semestrielle « surveillance radiologique de l'environnement des ports de Cherbourg, Brest et Toulon »,

- Cassette « Réseau surveillance nucléaire marine ».

- **SGS/Laboratoire Crepin**

2 rue Duguy Trouin, BP 1282, 76178 Rouen Cedex

tél. : 02.35.07.91.80, fax : 02.35.07.91.93

- Dossier de présentation Environnement.

- **SUBATECH - École des Mines de Nantes**

4 rue Alfred Kastler, La Chantrerie, BP 20722, 44307 Nantes Cedex 3

tél. : 02.51.85.81.00, fax : 02.51.85.84.79

site internet : www-subatech.in2p3.fr

- Brochure SMART/SUBATECH

- **Université de Franche Comté**

Institut des sciences et techniques de l'environnement (ISTE), BP 7 1427, 25211 Montbéliard Cedex

tél. : 03.81.99.46.92, fax : 03.81.99.46.85

- Plaquette activités ISTE.

RÉFÉRENCES

- AIEA (1992) *Statistical treatment of data on Environmental Isotopes in Precipitation*, Technical reports series N° 331, Vienna, Austria.
- AIEA (1994) *Handbook of parameter Values for the Prediction of radionuclide transfer in Temperate Environments*, Technical reports series N° 364, Vienna, Austria.
- Aigueperse J., Chalabreysse J., Coulon R., Grauby A., Uzzan G. (1981) Impact radiologique des rejets atmosphériques d'une centrale au charbon, pp. 195-214, *Proceedings of a Symposium on Health Impacts of Different Sources of Energy*, Nashville (USA), 22-26 juin 1981, 701 p.
- ANDRA (1998) Agence nationale de gestion des déchets radioactifs, *Inventaire national des déchets radioactifs*, Chatenay-Malabry, France.
- Belot Y., Roy M., Métivier M. (1996) *Le tritium de l'environnement à l'homme*, Coll. IPSN. Éditions de Physique, les Ulis, France.
- Bernhard S., Vauzelle Y., Zettwoog P. (1995) Measurement of the radiological impact of environmental radon 222 releases from heaps of solid wastes from the mineral industry pp. 20-24, *IRPA endorsed Int. Conf. on Radioprotection and Radioactive Waste Management in the Mining and Mineral Industries*, Johannesburg, South Africa.

- Calmet D., Bouisset P., Barker E. (1998a) Comportement du béryllium 7 atmosphérique, *Journées SFRP : Les irradiations naturelles en France*, Poitiers, France, 17-18 mars 1998.
- Calmet D., Boursier B., Bouisset P., Guiard A., Barker E. (1998b) Mushrooms as reference material for intercomparison exercises and as bioindicators of radiocesium deposition in soil (France and Central European Countries), *Appl. Rad. Isot.* **49** (1-2), 19-28.
- Caput C., Guenot J., Belot Y., Bourdeau F. (1981) Méthodologie de la mesure des émissions et des immissions de carbone 14 rejeté dans l'atmosphère par les centrales nucléaires françaises, *AIEA Colloque international sur les migrations dans l'environnement terrestre des radionucléides de longue période provenant du cycle du combustible nucléaire*, Knoxville (USA) 27-31 juillet 1981.
- Daillat O., Kirchner G., Jacquot L., Lecomte A., Tillier C., van Haluwyn C. (1996) Recherche d'éléments radioactifs naturels dans quelques lichens foliacés, *Pollution Atmosphérique oct/nov*, 65-79.
- Descamps B., Baudin-Jaulent Y. (1987) Étude radioécologique du complexe minier de Lodève (France), 1981-1985, Rapport CEA - R-5409, 98 p.
- Descamps B., Foulquier L. (1988) Natural radioactivity in the principal constituents of French river ecosystems, *IV^e International Symposium on the natural radiation environment*, Lisbonne, Portugal, 7-11 décembre 1987; *Rad. Prot. Dosim.* **24** (1-4), 143-147.
- EC (1998) European commission D.G. XI, Environmental Radioactivity in the European Community 1993, Rapport EUR 17714, 1998, 82 p.
- Foulquier L., Pally M. (1982) Données sur la teneur en tritium lié de poissons des grands fleuves français, *Journées de l'Union Internationale des Radioécologistes*, Wageningen, Hollande, 28-30 juin 1982, 23 p.
- Fournier M. (1998) Carbone 14 et tritium dans l'environnement. *Journées SFRP : Les irradiations naturelles en France*, Poitiers, France, 17-18 mars 1998.
- Germain P., Leclerc G., Simon S. (1992) Distribution of ^{210}Po in *Mytilus Edulis* and *Fucus Vesiculosus* along the channel coast of France ; Influence of industrial releases in the seine river and estuary, *Rad. Prot. Dosim.* **45** (1-4), 257-260.
- Germain P., Leclerc G., Simon S. (1995) Transfert of polonium-210 into *Mytilus edulis* (L) and *Fucus vericulosus* (L) from Baie de Seine (Channel coast of France), *Sci. Tot. Environm.* **164**, 109-123.
- Gontier G. (1998) Le potassium 40 dans l'environnement, *Journées SFRP : les irradiations naturelles en France*, Poitiers, 17-18 Mars 1998.
- Grauby A., Bourdeau F., Ottavi L., Hugon J. (1984) Mesures de radioactivité dans l'environnement : résultats et commentaires, *Congrès sur les données actuelles sur la radioactivité naturelle*, Monte-Carlo, 5-7 novembre 1984.
- GRNC (1999) Estimation des doses et du risque de leucémie associée, Rapport GRNC, Vol. 4, 365 p.
- Guerere M., Tisse C., Pelleau Y., Picat P., Bernard J., Quinault J.M., Santoni P., Cartier Y., Feuerstein J. (1989) Niveaux de radioactivité de la ration alimentaire d'un citadin de la région PACA deux ans après Tchernobyl. Enseignements en terme de qualité et de sécurité des aliments, *Séminaire sur le transfert de la radioactivité au cours des transformations agro-alimentaires et des préparations culinaires*, Cadarache, 18-21 septembre 1989.
- ICRP Publication 65 (1993) International commission on radiological protection against radon-222 at home and at work, *Ann. ICRP* **22** (2), Pergamon Press, Oxford, UK.
- Jammet H. (1984) Importance relative de l'irradiation naturelle dans l'ensemble des expositions humaines, *Congrès sur les données actuelles sur la radioactivité naturelle*, Monte-Carlo, 5-7 novembre 1984.

- JOCE (1996) Journal officiel des communautés européennes, Directive 96/29, Euratom du conseil du 13 mai 1996, fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants, N° L 159 du 29 juin 1996.
- Lambrechts A., Foulquier L., Garnier-Laplace J. (1992) Natural radioactivity in the aquatic components of the main French rivers, *Rad. Prot. Dosim.* **45** (1-4), 253-256.
- Madelmont C., Rannou A., Renguard H., Jeanmaire L. (1984) Sources externes : cosmique, tellurique et domestique, *Congrès sur les données actuelles sur la radioactivité naturelle*, Monte-Carlo, 5-7 novembre 1984.
- Métivier H., Robé M.C. (1998) *Le Radon de l'environnement à l'homme*, Coll. IPSN, EDP Sciences, Les Ulis, France.
- OPRI (1997) Office de protection contre les rayonnements ionisants, Rapport d'activité 1997, Le Vesinet, France.
- Patti F., Jeanmaire L., Masson M., Pinton Ph., Garcet M. (1990) Temporal variations of iodine-127, potassium-40 and technetium-99 concentrations in *Fucus serratus* in the English Channel, *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **142** (2), 467-480.
- Rémy M.L., Lemaître N. (1990) Eaux minérales et radioactivité, *Hydrogéol.* **4**, 267-278.
- Rémy M.L., Pellerin P. (1968) Radioactivité naturelle de 250 sources hydrominérales françaises, *Bull. INSERM* **23** (1), 23-62.
- Renoux A. (1984) La radioactivité naturelle de l'air hors des maisons, *Congrès sur les données actuelles sur la radioactivité naturelle*, Monte-Carlo, 5-7 novembre 1984.
- Robé M.C., Rannou A., Le Bronec J., Tymen G. (1992a) Le radon dans les habitations : identification des sources et des voies de transfert et caractérisation des aérosols radioactifs produits, Men. Expl. Cartes géologiques et minières de Belgique, N° 32, pp. 93-103.
- Robé M.C., Rannou A., Le Bronec J. (1992b) Radon measurement in the environment in France, *Rad. Prot. Dosim.* **45** (1/4), 455-457.
- Ryan T.P., Germain P., Dowdall A.M., Leclerc G., Pollard D. (1997) A comparison of ^{210}Pu in *Mytilus edulis* and *Fucus vesiculosus* in French and Irish Coastal waters. Radioprotection, *Colloque radionuclides in the oceans. Radoc 96-97, Proceed. Part 1*. Cherbourg-Octeville, France, 7-11 october 1996, Radioprotection **32** (C2), 345-352.
- Saito K., Jacob P. (1995) Gamma ray fields in the air due to sources in the ground, *Rad. Prot. Dosim.* **58** (1), 29-45.
- Schmidt S., Reyss J.L., Landre F., Boust D. (1998) Distributions and fluxes of ^{226}Ra and ^{228}Ra in the Irish sea and in the English Channel, in relation to hydrological conditions and sediment interactions, *Rad. Prot. Dosim.* **75** (1-4), 65-67.
- SFRP (1998) Société française de radioprotection, La radioactivité naturelle en dix épisodes, *Journées SFRP*, Poitiers, 17-18 mars 1998.
- Thébault H., Charmasson S., Calmet D., Arnaud M., Henocque Y. (1998) The Coastal Mediterranean monitoring network project: radionuclide survey, *Rad. Prot. Dosim.* **75** (1-4), 49-56.
- Tort V., Lefauve C., Linden G., Harblet J. (1997) Le tritium dans le milieu aquatique et le risque associé, *Radioprotection* **32** (4), 501-519.
- UNSCEAR (1988) *Sources, Effects and Risks of Ionising Radiations*, Report to the General Assembly with scientific annexes, E.88.IX.7, Nations Unies, New-York.
- UNSCEAR (1993) *Sources, Effects and Risks of Ionising Radiations*, Report to the General Assembly with scientific annexes, E.94.IX.2, Nations Unies, New-York.
- Zettwoog P., Lemaître N., Bernhard S., Vauzelle Y. (1997) Utilisation de la signature isotopique des radionucléides relâchés par les mines et les usines de traitement de minerais d'uranium pour discriminer aux bas niveaux leur impact environnemental de celui de la radioactivité tellurique naturelle, *Radioprotection* **32** (4), 467-489