

INIS

CEA-N-1962

FR 7701488

- Note CEA-N-1962 -

Centre d'Etudes Nucléaires de Fontenay-aux-Roses
Institut de Protection et de Sécurité Nucléaire
Département de Protection
Service de Protection Sanitaire

**ASPECTS PRATIQUES DU COMPORTEMENT DES ISOTOPES
DU STRONTIUM DANS L'ENVIRONNEMENT**

par

Claude MADELMONT, Robert BIETEL, François DABURON

- Mars 1977 -

Note CEA-N-1962

DESCRIPTION-MATIERE (mots clefs extraits du thesaurus SIDON/INIS)

en français

en anglais

STRONTIUM	STRONTIUM
STRONTIUM 90	STRONTIUM 90
STRONTIUM 85	STRONTIUM 85
VOIES D'EXPOSITION DANS L'ENVIRONNEMENT	ENVIRONMENTAL EXPOSURE PATHWAY
CONCENTRATION RADIOECOLOGIQUE	RADIOECOLOGICAL CONCENTRATION
MIGRATION DES RADIONUCLEIDES	RADIONUCLIDE MIGRATION
AIR	AIR
EAUX DE SURFACE	SURFACE WATERS
SOLS	SOILS
HOMME	MAN
CHAINES ALIMENTAIRES	FOOD CHAINS
IRRIGATION	IRRIGATION
LAIT	MILK
FARINE	FLOUR
PRODUITS LAITIERS	MILK PRODUCTS
BOISSONS	BEVERAGES
CEREALES	CEREALS
LEGUMES	VEGETABLES
ABSORPTION PAR LES FEUILLES	FOLIAR UPTAKE
ABSORPTION PAR LES RACINES	ROOT UPTAKE
ALGUES	ALGAE
CRUSTACES	CRUSTACEANS
MOLLUSQUES	MOLLUSCS
SEDIMENTS	SEDIMENTS
POISSONS	FISHES
EAU DE MER	SEAWATER
VIANDE	MEAT
FOURRAGE	FORAGE

- Note CEA-N-1962 -

**Centre d'Etudes Nucléaires de Fontenay-aux-Roses
Institut de Protection et de Sécurité Nucléaire
Département de Protection
Service de Protection Sanitaire**

**ASPECTS PRATIQUES DU COMPORTEMENT DES ISOTOPES
DU STRONTIUM DANS L'ENVIRONNEMENT**

par

Claude MADELMONT, Robert BITTEL, François DABURON

**Rapport préparé dans le cadre des groupes de travail
du Département de Protection du Commissariat à l'Energie Atomique
"Caractéristiques des polluants - Caractéristiques du milieu"**

CEA-N-1962 - MADELMONT Claude, BITTEL Robert, DABURON François

ASPECTS PRATIQUES DU COMPORTEMENT DES ISOTOPES DU STRONTIUM DANS
L'ENVIRONNEMENT

Sommaire.- Cette note rappelle sur un plan pratique les modalités de contamination par les isotopes du strontium de la chaîne alimentaire - végétaux terrestres en insistant sur les conséquences de l'irrigation (niveau de contamination à l'équilibre) - produits laitiers avec adaptation d'un modèle général à des conditions régionales (paramètres quantitatifs présentés dans un tableau pour quelques régions françaises) - produits marins et d'eau douce. On insiste sur le fait que les paramètres de transfert peuvent évoluer au cours du temps et que leur appréciation ne peut être définitive.

1977

22 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

CEA-N-1962 - MADELMONT Claude, BITTEL Robert, DABURON François

PRACTICAL ASPECTS OF THE ENVIRONMENTAL BEHAVIOUR OF STRONTIUM ISOTOPES

Sommaire.- The practical aspects of contamination patterns of the food chain by strontium isotopes are reviewed - plants with special emphasis on the consequences of irrigation (contamination level at equilibrium) ; dairy products and the adjustment of a general model to regional conditions (a table of quantitative parameters for some French regions is included) ; marine and freshwater products. One should keep in mind that transfer parameters may change with time and cannot be assessed definitively.

1977

22 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

AVERTISSEMENT

Cette note sur le comportement des isotopes du strontium dans l'environnement ne constitue pas une mise au point bibliographique. Rédigée par un groupe de travail du Département de Protection elle a pour but de présenter de façon succincte des modalités de contamination de la chaîne alimentaire par ces radionucléides ; elle voudrait s'adresser plus particulièrement à des lecteurs préoccupés par des problèmes pratiques d'environnement plus qu'à des spécialistes de la recherche appliquée. Nous serions satisfaits d'avoir pu montrer dans certains paragraphes combien les facteurs ou les modèles de transfert doivent être interprétés en fonction des conditions locales. Dans un territoire aussi diversifié que le nôtre sur le plan de la climatologie, de la pédologie et des pratiques agricoles, ceci reste fondamental.

ASPECTS PRATIQUES DU COMPORTEMENT DES ISOTOPES DU STRONTIUM DANS L'ENVIRONNEMENT

INTRODUCTION

Parler des isotopes du strontium dans l'environnement c'est évoquer essentiellement le cas du strontium 90, car sa période radioactive de 28 ans et son comportement biologique voisin du calcium en font un des radionucléides les plus préoccupants sur le plan sanitaire ; le strontium 89 en raison de sa période de 54 jours est caractérisé par une radiotoxicité nettement inférieure.

Le comportement du ^{90}Sr dans l'environnement peut s'étudier par l'expérimentation et par l'observation. Dans le premier cas, des milieux artificiellement délimités sont contaminés (cases lysimétriques, cultures en pots, aquariums). On fait varier tel paramètre ou tel groupe de paramètres et les conséquences sont étudiées sur le comportement physique et métabolique. Ceci conduit à des hypothèses dont l'extrapolation aux conditions naturelles peut se montrer aléatoire. Dans le second cas, c'est par l'observation in situ du comportement des retombées radioactives que d'autres hypothèses peuvent être avancées. Cette analyse des mécanismes est plus délicate car on ne peut faire varier à volonté les paramètres, mais on sait que les conditions naturelles sont respectées. Avec leurs avantages et les inconvénients, ces deux méthodes d'étude sont nécessaires et très utilement complémentaires.

Comme pour les autres radionucléides, on définit un facteur de transfert F :

$$F = \frac{\text{activité (volumique ou massique) d'un indicateur ou d'un vecteur}}{\text{activité (volumique ou massique) d'un milieu contaminant}}$$

En raison de la parenté physiologique avec le calcium, on utilise plus fréquemment, et parcequ'il décrit mieux les processus de transfert, le rapport observé :

$$RO = \frac{{}^{90}\text{Sr/Ca d'un indicateur ou d'un vecteur}}{{}^{90}\text{Sr/Ca du milieu contaminant}}$$

Dans un processus physiologique, le rapport RO peut s'appliquer entre un compartiment et un compartiment précurseur. Sur le plan des définitions, certains auteurs réservent la dénomination de facteur de discrimination à la résultante d'un produit de plusieurs rapports observés.

VOIES DE TRANSFERT DU STRONTIUM 90 VERS L'HOMME

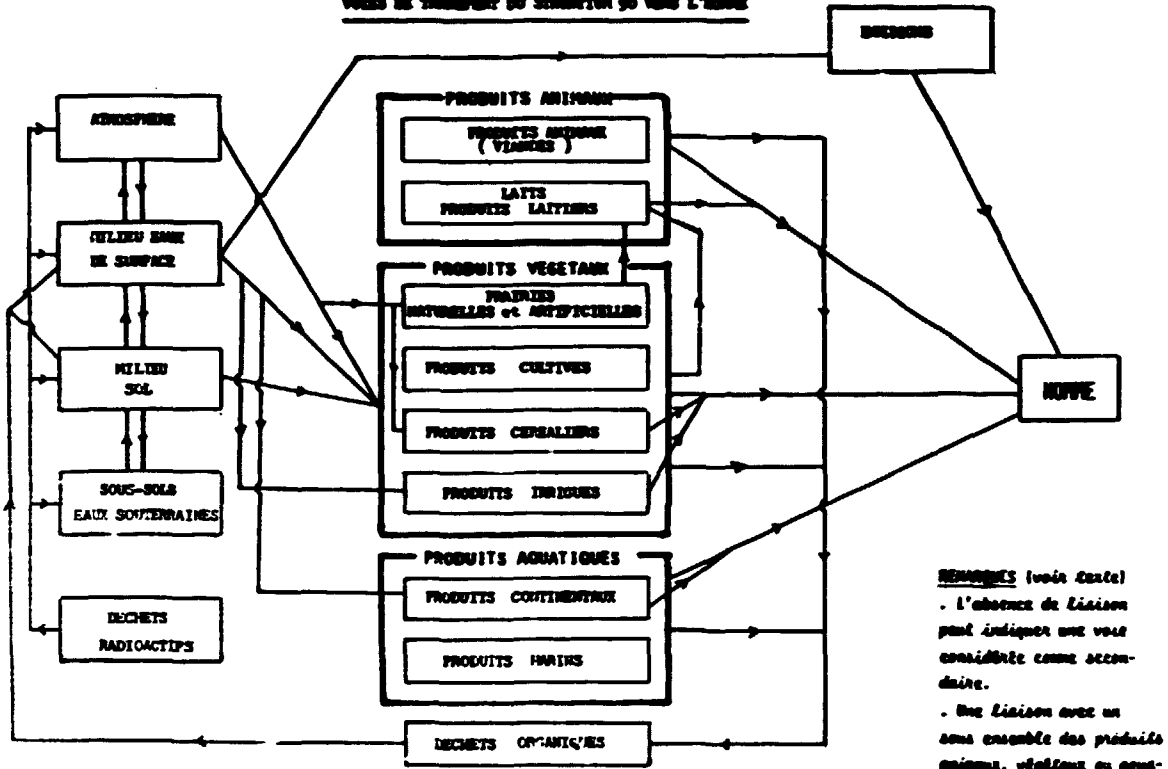


FIGURE 1

REMARQUES (voir texte)
 - L'absence de liaison peut indiquer une voie considérée comme secondaire.
 - Une liaison avec un sous-ensemble des produits animaux, végétaux ou aquatiques indique une voie plus critique.

VOIES DE TRANSFERT DU ⁹⁰Sr AUX VEGETAUX

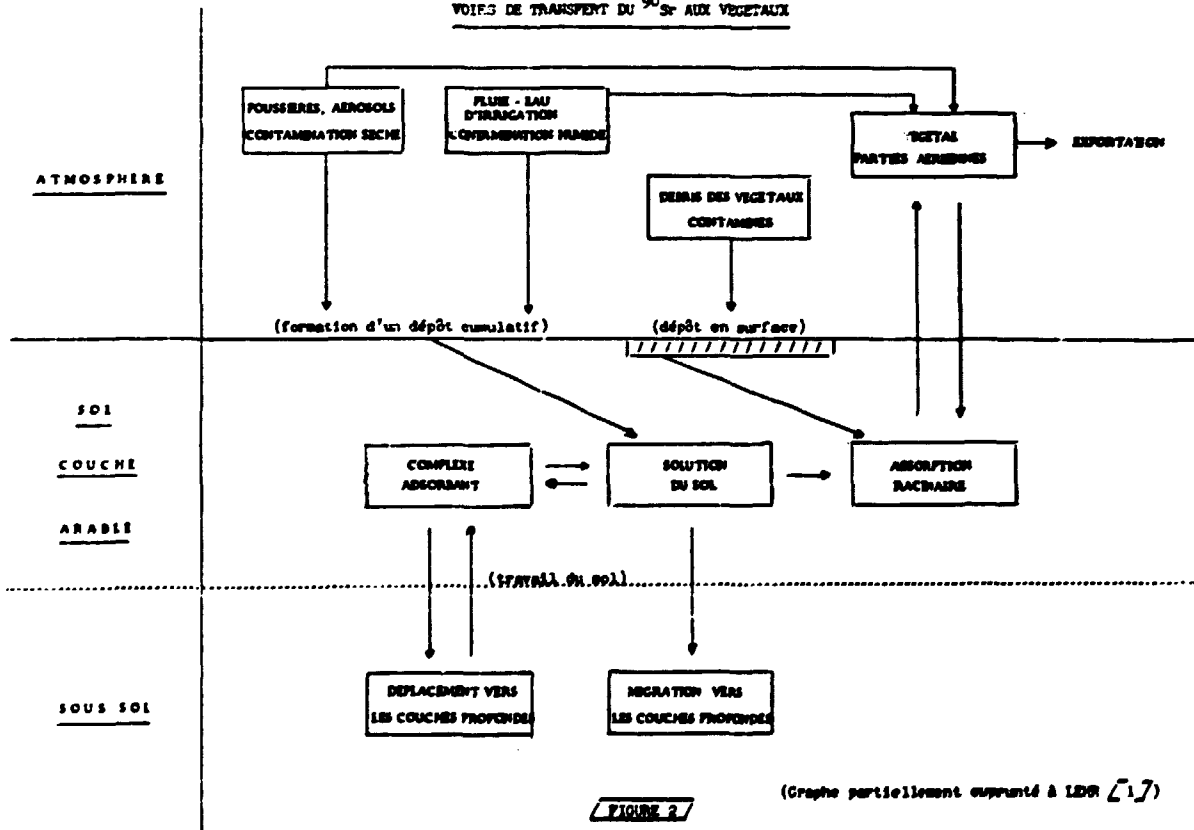


FIGURE 2

(Graphique partiellement emprunté à LDR [1])

I - PRINCIPALES VOIES DE CONTAMINATION

Les principales voies de contamination de l'homme par le ^{90}Sr sont représentées par les flèches reliant les différents compartiments du groupe de la figure 1. Cependant, pour tenir compte du fait que la contamination d'un compartiment peut présenter des variations quantitatives importantes en fonction de ses modalités de contamination (il faudrait représenter des flèches d'intensité variable), nous avons considéré les produits animaux, les produits végétaux et les produits aquatiques comme des ensembles (traits d'encadrement épais) comportant des sous-ensembles (traits d'encadrement fins). Avec cette distinction :

- . l'absence de liaison entre deux compartiments peut être réelle ou traduire une importance secondaire ;
- . les liaisons avec des ensembles matérialisent des voies importantes ;
- . les liaisons avec des sous-ensembles matérialisent des voies critiques.

Pour des commodités d'ordre pratique, les principales voies de transfert de contamination pour l'homme sont abordées dans l'ordre d'importance décroissant pour les produits végétaux et animaux d'origine terrestre et enfin pour les produits d'origine aquatique.

II - CONTAMINATION DES PRODUITS VEGETAUX TERRESTRES

II-1 Modalités générales de contamination

La contamination des végétaux terrestres est la résultante de plusieurs mécanismes qui comprennent :

- . la "contamination directe" des organes aériens végétatifs ou reproducteurs par les poussières, les aérosols, les pluies contaminées - cette contamination met en oeuvre des processus d'adsorption et d'absorption ;
- . la contamination due à l'absorption minérale racinaire qui est généralement appelée "contamination indirecte" et qui implique qu'un état d'équilibre s'établisse entre la solution du sol et le complexe adsorbant. Cette contamination indirecte peut également procéder de l'absorption à partir d'eau contaminée utilisée en irrigation souterraine ;
- . une "contamination mixte", particulière à la production des fourrages sur les prairies permanentes, qui implique un processus d'adsorption racinaire dans la couche superficielle des débris végétaux en voie de dégradation, sans que la notion d'équilibre existant au niveau du sol sous-jacent (solution - complexe) n'intervienne.

Ce schéma général est représenté par la figure 2. Il est souvent à la base de formulations de modèles de contamination élaborés à partir des observations faites sur le milieu et selon la relation suivante :

$$C = Pr_1 \times (\text{dépôt récent}) + Pr_2 \times (\text{dépôt antérieur}) + Pd \times (\text{dépôt cumulé au sol})$$

contamination	contamination	contamination	
du végétal	directe	mixte	indirecte

Pr_1 et Pr_2 étant des paramètres qui peuvent dépendre du végétal et des pratiques culturales, Pd est un paramètre qui dépend des caractères pédologiques.

Dans cette formule, l'évaluation du dépôt cumulé tient compte d'une décroissance exponentielle qui est la résultante de la décroissance radioactive, des pertes provoquées par la migration vers les couches profondes et par l'exportation due à la production végétale. La constante de temps λ de cette décroissance peut varier sensiblement (voir plus loin : modèle de la contamination du lait).

Le strontium métabolisé par le végétal est inégalement réparti. Ce sont en général les tissus les plus minéralisés qui sont les plus riches.

Cette inégalité est importante à considérer, car les habitudes alimentaires et les transformations technologiques peuvent influencer la contamination (taux d'extraction de farine des céréales).

II-2 Cas des végétaux irrigués

Sur un plan pratique, l'élimination du strontium dans le sol qui vient d'être évoqué, conduit à un concept particulièrement intéressant pour l'irrigation des productions végétales. Il est, en effet, facile de concevoir que: si les apports de contamination sont constants, on puisse atteindre un régime d'équilibre, si l'activité apportée compense l'activité éliminée. Dans ce cas, si la production végétale présente une contamination compatible avec les normes sanitaires, le problème de protection posé par l'utilisation d'eau d'irrigation contaminée est théoriquement résolu.

Avec :

- λ = constante de temps de décroissance du ^{90}Sr ,
- γ_1 = constante de temps d'élimination par infiltration,
- γ_2 = constante de temps d'élimination par exportation végétale,
- d = intensité d'apport par eau d'irrigation par unité de temps et de surface du sol,
- b = activité spécifique de l'eau,
- C = coefficient d'assimilabilité du végétal,
- R = contamination du végétal en unité d'activité par unité de poids,
- R' = contamination du sol par unité de surface,
- k = facteur qui dépend des unités,

la contamination du sol peut s'écrire à l'équilibre :

$$R' = \frac{k b d}{\lambda + \gamma_1 + \gamma_2}$$

La valeur désignée par C est représentée par le rapport :

$$C = \frac{R}{R'}$$

La contamination du végétal peut alors s'écrire :

$$R = \frac{C k b}{\lambda + \gamma_1 + \gamma_2} \times d$$

Cette expression signifie qu'un poids de végétal contient une contamination égale à celle qui est contenue dans R unités de volume d'eau d'irrigation [2 - 6].

TABEAU I

**VALEURS LIMITEES DU COEFFICIENT R POUR DIFFERENTES PRODUCTIONS LEGUMIERES
ET POUR DIFFERENTS TYPES DE SOL**

. La valeur de λ est la constante de temps d'élimination dans le sol du strontium 90 résultant de la décroissance radioactive des pertes par infiltration et par exportation.
. La valeur de R est estimée pour 500 litres d'eau par an par m².

TYPE DE SOL	DELMAS [7,8]			BARBIER [2,3]		
	SOL BRUN DES COSTIERES	LIMON ANCIEN DURANCE	SOL DE REFERENCE	AVIGNON	TOULOUSE	BORDEAUX
ARGILE %	8	9	17	17,7	26,5	1,3
MATIERE ORGANIQUE %	1,23	1,56	ND	4,2	4,1	4,9
pH	8	7,8	8,1	8,2	6,2	7,9
CAPACITE D'ECHANGE (meq/100 g)	6,9	6,9	ND	19,4	45,0	4,3
Ca ECHANGEABLE (meq/100 g)	ND	ND	59,6	ND	39,6	3,6
CALCAIRE TOTAL %	trace	43	23	34	0	00
CAPACITE D'ECHANGE ESTIMEE	7	7	60	20	42	4
VALEUR DE λ (an ⁻¹)		= 0,015		= 0,015	= 0,01	= 0,03
TYPE DE LEGUME		4,8		3,5 (60)		
HARICOTS VERTS				1,5 (61)		
				3,8 (62)		
TOMATES		1,9				2,1 (61)
	1,8				2,3 (61)	5,2 (60)
POMMES DE TERRE					0,9 (62)	4,9 (61)
						2,8 (62)
SALADES		21,0		3,3 (60)	28,0 (60)	40,0 (60)
				6,0 (61)	7,3 (61)	51,0 (61)
				7,9 (62)		
				9,3 (60)		
CHOUX FLEURS				1,0 (61)		
				2,3 (62)		
POIREAUX					7,0 (60)	
CAROTTES						30 (62)
CHOUX						78 (61)
EPINARDS					5,6 (61)	
VALEURS MOYENNES						
SALADES		21,0		5,7	17,6	30,3
POMMES DE TERRE	1,8				1,6	
HARICOTS		4,8		2,9		4,3

- Les chiffres entre parenthèses indiquent les années d'observation.

REMARQUE

Cette notion d'équilibre peut être généralisée dans le cas où la contamination apportée à un milieu récepteur et producteur est égale à la contamination qui s'en élimine ou, ce qui revient au même, qui devient définitivement indisponible.

II-3 Quelques aspects quantitatifs

II-3-1 Absorption racinaire

L'ensemble de la littérature donne un rapport observé voisin de 1 pour le rapport :

$$RO = \frac{\text{Sr/Ca plante totalité}}{\text{Sr/Ca solution du sol}}$$

Ceci signifie que l'absorption racinaire ne discrimine pas, dans la solution du sol, le strontium du calcium. Les caractéristiques de cette solution dépendant du complexe adsorbant, on met en évidence le rôle fondamental du sol dans la contamination indirecte. On peut quantitativement apprécier ce rôle à partir des résultats d'une analyse agronomique en admettant, tout en simplifiant, que la contamination sera d'autant plus importante que BITTEL [6] :

- . le pH de la solution est acide,
- . la teneur en Ca échangeable est faible,
- . la capacité d'échange est faible.

Si on pose

$$K = \frac{\text{Sr/Ca solution du sol}}{\text{Sr/Ca complexe}}$$

un certain nombre d'auteurs cités par LEHR [1] trouvent des valeurs de K voisines de 0,8.

II-3-2 Contamination de productions végétales

LEHR donne quelques valeurs pour le rapport

$$RO = \frac{{}^{90}\text{Sr/Ca plante}}{{}^{90}\text{Sr/Ca (solution + complexe)}}$$

Asperge	= 1,35	Blé (paille)	= 3,00
Tournesol	= 1,08	Blé (grain)	= 1,00
Tomates	= 0,90	Haricots (feuilles)	= < 3,00
Orge (pousses)	= 0,98	Haricots (tiges)	= > 1,00

RIVERA [9] a proposé un modèle de contamination des céréales selon la formule précédemment indiquée :

$$C = 0,259 D + 259 R'$$

$$C = 0,259 D + 259 R'$$

pCi/gCa dépôt cumulé retombée en juin
(grain) mCi/km² mCi/km²

Les céréales étant cultivées sur des sols travaillés, le processus de "contamination mixte" précédemment défini n'existe pas. Les dépôts de contamination du mois de juin sont prépondérants car c'est à partir du stade de la formation des épis que la contamination directe peut devenir importante. COULON [10] a également montré la sensibilité de contamination des céréales à partir de ce même stade végétatif. Il a montré, en outre, que vraisemblablement les espèces de blé les plus précoces sont plus sensibles que les espèces tardives.

Souvent, les processus de contamination globale des végétaux ont été étudiés par l'intermédiaire de la contamination du lait; ceci sera examiné plus loin.

II-3-3 Contamination apportée par l'irrigation

Le tableau I donne des valeurs de R pour différents types de sol et différentes productions de légumes. Ces valeurs sont à considérer comme étant la résultante de la contamination due à l'aspersion et à l'absorption racinaire.

Si on considère la contamination due à l'aspersion seule, DELMAS a donné quelques valeurs pour le rapport

$$\frac{\text{Contamination d'un kg de légumes}}{\text{Contamination d'un litre d'eau d'aspersion}}$$

Ces valeurs, comprises entre 0,14 et 0,70 avec une moyenne de 0,40, sont valables pour des eaux aux caractères physico-chimiques voisines de celles du Rhône.

II-3-4 Répartition de la contamination dans le végétal

Dans le végétal, le strontium est associé au calcium et on peut observer que l'activité rapportée au kilogramme sec ou au kilogramme frais est d'autant plus grande que la partie mesurée est plus minéralisée (voir expérience de MARTIN [11] partiellement décrite au tableau II).

Un aspect important de cette inégalité de répartition réside dans la contamination du grain de blé. Les résultats du tableau III montrent, sans ambiguïté, que cette contamination est métabolisée. En effet, la période d'observation de 1963 à 1967 comprend des années à fortes retombées radioactives (1963 - 1964) et des années à faibles retombées, surtout parmi les dernières. Malgré les modes de contamination différents - forte contamination directe pour les premières années, prédominance de la contamination indirecte pour les dernières - la répartition du strontium 90 entre la farine et les issues est restée à peu près constante. Le grain de blé protégé par la balle, fixe le strontium qui est métabolisé par l'ensemble des organes végétatifs et le répartit entre enveloppe et farine de façon constante, quel que soit le mode de contamination [12, 13].

A noter que les pourcentages d'activité en ⁹⁰Sr entre les issues et les farines dépendent étroitement du taux de blutage mais que le rapport

$$\frac{{}^{90}\text{Sr/Ca (farine)}}{{}^{90}\text{Sr/Ca (issues)}}$$

ne varie pas sensiblement en fonction de ce taux (voir tableau III).

TABLEAU II

REPARTITION DU STRONTIUM DANS L'ORGE
EXPERIMENTATION EN CULTURE HYDROPONIQUE AVEC DU STRONTIUM 85

	RAPPORT OBSERVE	REPARTITION DU Sr (%)
PLANTE TOTALE	0,97	100 %
RACINE	1,66	4,13 %
PARTIE AERIENNE	0,95	95,9 %
VEGETAL (AXE PRINCIPAL)		
EPIS	1,13	1,68 %
FEUILLE	0,90	36,5 %
NOEUDS (tige)	2,41	1,05 %
ENTRENOEUD (tige)	2,96	1,00 %

TABLEAU III

REPARTITION DU STRONTIUM DANS LE GRAIN DE BLE, LA FARINE ET LES ISSUES (F ET I)
RESULTATS DE 10 ANNEES D'OBSERVATION SUR LA CONTAMINATION DES CEREALES EN FRANCE
(TAUX D'EXTRACTION A 80 %) DEPARTEMENT DE PROTECTION C.E.A.

Répartition de l'activité entre la farine et les issues valeurs extrêmes (%)	F = 23 (12 - 34)	I = 77 (88 - 66)
Rapport $\frac{^{90}\text{Sr}/\text{Ca farine}}{^{90}\text{Sr}/\text{Ca issues}}$		
Valeurs moyennes		0,482
Valeurs extrêmes		(0,203 - 0,981)
Ecart type		0,205

III - CONTAMINATION DES PRODUITS ANIMAUX EN MILIEU CONTINENTAL

III-1 Les produits laitiers

Le lait et les produits laitiers constituent pour les régimes alimentaires de type occidental un des principaux vecteurs de la contamination interne due aux isotopes radioactifs du strontium.

Comme cela a été dit plus haut, la contamination du lait a été largement étudiée par l'observation des conséquences de la pollution des fourrages due aux retombées radioactives. COULON [14] a proposé pour le ^{90}Sr le modèle suivant dans l'étude de la contamination d'un lait récolté en Seine Maritime

$$C_i = Pd \sum_{p=i-1}^{p=\infty} R p e^{-\lambda[(i-1)-p]} + Pr_1 \sum_{n=i}^{n=i-1} R_n + Pr_2 \sum_{m=i-2}^{m=i-7} R_m$$

- i = indice du mois considéré i - 1, i - 2 pour les mois précédents,
- C = contamination du lait en pCi ^{90}Sr par gramme de calcium,
- R = dépôt humide du ^{90}Sr en mCi/km²,
- λ = constante de temps d'élimination du dépôt du ^{90}Sr dans le sol,
- Pd = exprimé en pCi ^{90}Sr /g Ca par mCi/km² dépôt cumulé au sol,
- Pr₁ = exprimé en pCi ^{90}Sr /g Ca par mCi/km² dépôt humide,
- Pr₂ = exprimé en pCi ^{90}Sr /g Ca par mCi/km² dépôt humide.

Ce modèle a été appliqué [15] aux résultats de contrôle régionaux de lait en France de 1963 à 1974. Les valeurs trouvées pour les différents paramètres Pd, Pr₁ et Pr₂ sont indiquées au tableau IV. Les variations observées de ces derniers peuvent être rapportées aux conséquences de facteurs climatiques et zootechniques variés. On peut citer, entre autres, le pourcentage des prairies permanentes par rapport aux prairies artificielles, l'importance de l'affouragement par rapport aux produits cultivés (betteraves etc.), les types de sol, les variations de la composition botanique des surfaces herbeuses et les différences de profondeur d'enracinement qui peuvent en résulter. Il est difficile d'inclure ces facteurs dans un modèle mathématique.

Pour un pays diversifié géographiquement, l'existence d'un modèle général avec des paramètres adaptés aux régions qui le composent permet d'estimer au mieux le comportement d'une contamination et d'en tirer des conséquences plus précises sur le plan prévisionnel.

La contamination du lait a été étudiée également par rapport à l'animal producteur lui-même, aussi bien sur le plan expérimental que par observation. GARNER [16] propose pour la vache laitière le modèle suivant, dans le cas d'une contamination unique :

$$C_t = 5,5 \times 10^{-4} e^{-0,48t} + 1,0 \times 10^{-6} e^{-0,017t} - 5,5 \times 10^{-4} e^{-1,58t}$$

dans lequel :

- C_t est la fraction de la dose ingérée par litre de lait au temps t, t étant exprimé en jour,

La première exponentielle avec une période de 1,44 j représente l'élimination du strontium non fixé, la deuxième avec une période de 41 j représente le strontium fixé sur le squelette, la troisième exponentielle étant une fonction d'ajustement.

TABEAU IV

MODELE DE CONTAMINATION PAR LE ⁹⁰Sr DE LAITS D'ORIGINES DIFFERENTES
 VALEUR DES PARAMETRES λ Pd Pr₁ ET Pr₂

	Période d'observation	λ_{an-1}	Pd	Pr ₁	Pr ₂
Vienne (prélèvement usine)	62-71	0,12	0,42	2,88	1,45
Garonne (prélèvement régional)	63-72	0,10	0,22	6,56	2,42
Bresse Lyonnais (prélèvement régional)	64-72	0,14	0,47	2,82	1,50
Landes (prélèvement régional)	63-72	0,18	0,72	5,43	3,40
Anjou Vendée (prélèvement régional)	64-72	0,08	0,32	6,38	1,35
Normandie (prélèvement régional)	64-72	0,12	0,35	7,78	2,47
Seine Maritime (prélèvement usine)	60-72	0,16	0,39	5,66	2,35
Charentes (prélèvement régional)	63-72	0,12	0,40	3,31	1,60
Aisne (prélèvement usine)	61-72	0,20	0,48	7,92	1,37

Un autre fait d'importance est que l'animal constitue, en réalité, une barrière de protection pour l'homme car le rapport

$$\frac{{}^{90}\text{Sr/Ca (lait)}}{{}^{90}\text{Sr/Ca (alimentation de l'animal)}}$$

est compris, pour l'ensemble de la littérature, entre 0,10 et 0,20. Nous avons pu mesurer ce rapport chaque quinzaine pendant neuf mois sur un troupeau en expérimentation de l'INRA dont l'affouragement était à base de luzerne ; nous avons trouvé une valeur moyenne de 0,13.

III-2 Autres vecteurs alimentaires

La contamination de la viande peut être estimée par la valeur du rapport suivant :

$$\frac{\text{Sr/Ca (viande)}}{\text{Sr/Ca (lait)}} = 0,80$$

Comme les produits carnés sont peu riches en calcium, cette voie de contamination peut être considérée comme très secondaire.

Pour les oeufs MORICE [17] donne les rapports observés suivants :

$$\begin{aligned} \text{RO} &= 0,5 \text{ à } 0,6 \text{ pour la coquille et le jaune,} \\ \text{RO} &= 1,5 \text{ pour le blanc.} \end{aligned}$$

Cette dernière valeur est sans grande signification puisque le blanc est très peu minéralisé.

IV - MILIEU MARIN

IV-1 Aspects généraux

Les mers, en raison des surfaces exposées aux retombées, de la réception des eaux continentales, des rejets qui sont pratiqués directement ou indirectement, contiennent en activité absolue plus de strontium 90 que les continents. Elles ne constituent pas, cependant, un milieu favorable à cette contamination des êtres vivants par suite de la dilution isotopique vraie due au strontium stable (8 à 11 mg/litre) et de la dilution "physiologique" due au calcium (500 mg/litre).

Les facteurs de transfert présentent des valeurs dispersées. Cela tient aux modes de vie et de contamination des espèces considérées et principalement à leur niveau trophique dans la pyramide écologique marine. Pour l'homme, il faut considérer, en outre, que les parties consommables de la faune marine sont, pour la plupart, des masses musculaires et que ces tissus peu minéralisés ne peuvent devenir des vecteurs importants.

IV-2 Aspects quantitatifs

. Facteur de concentration

Il faut signaler la difficulté de mesurer des facteurs de concentration (état d'équilibre difficile à définir et à obtenir - référence à l'eau brute et à l'eau filtrée - habitat mixte constitué par l'eau et les sédiments). Quelques valeurs moyennes sont données au tableau V où sont distingués parties consommables et organismes entiers.

TABEAU V

FACTEUR DE CONCENTRATION MOYEN DES ORGANISMES MARINS POUR LE ⁹⁰Sr

	Organisme entier	Parties consommables
Algues	100	-
Crustacés	50	0,1 → 1
Mollusques	30 (20)	0,1 → 1
Sédiments	30	-
Poissons	5	0,03 → 2

TABEAU VI

REGIME ALIMENTAIRE DE LA REGION PARISIENNE
 APPORT ANNUEL EN CALCIUM (en g/an)

Lait (1)	195	71,5 %
Céréales	18	6,6 %
Légumes feuilles	33,4	12,2 %
Légumes racines	17,3	6,3 %
Légumes fruits	5,6	2,1 %
Viande	3,6	1,3 %

Pour les poissons eurymalins (brochets et gardons de la Baltique), les valeurs de F peuvent être voisines de 30.

Quelques exemples du facteur de discrimination eau-poisson sont donnés ci-après :

- . le hareng $R_0 = 0,04$ à $0,12$
- . l'eglefin $R_0 = 0,18$ à $0,20$

Cependant, la valeur de 0,22 pour l'ensemble des espèces peut être considérée comme une moyenne.

V - MILIEU DES EAUX DOUCES

D'une façon très générale, les facteurs de transfert de contamination en eaux douces sont d'autant plus élevés que celles ci contiennent moins d'éléments en solution.

Le calcium soluble joue un rôle important ; on a pu relier le facteur de transfert à la teneur en calcium par la relation [18] :

$$\log F = K - K' \log Ca$$

F = Facteur de concentration eau-poisson

Ca = Concentration en calcium de l'eau

K et K' = des constantes

Si Ca est exprimé en ppm, cette relation s'écrit :

pour les poissons entiers $\log F = 3,3 - 0,8 \log Ca$

pour les muscles $\log F = 2,6 - 0,8 \log Ca$

Dans toutes ces études, les valeurs obtenues avec le strontium stable sont très voisines. Pratiquement, pour les eaux douces où seuls les poissons constituent un vecteur alimentaire pour l'homme, les valeurs suivantes peuvent être retenues:

F	limites inférieures	limites supérieures
Muscles	1	100
Poissons entiers	10	10 000

VI - IMPORTANCE RELATIVE DES VOIES DE TRANSFERT

Connaître les principales voies de transfert de contamination du strontium pour l'homme et les situer les unes par rapport aux autres, présente un intérêt certain. Le tableau VI donne, pour la région parisienne, les origines des principaux apports calciques et par là même, les principaux vecteurs de contamination, à savoir : le lait, les produits laitiers, et les légumes feuilles. C'est là, une connaissance globale et qualitative. L'appréciation quantitative est plus délicate, car la contamination de ces vecteurs résulte, nous l'avons vu, d'un mode direct et indirect et ces deux processus varient au cours du temps. Le tableau VII donne quelques paramètres de transfert, certains varient considérablement selon les modalités mises en cause (il existe plus d'un facteur 40 pour les céréales entre les conséquences d'une activité déposée - retombée et contamination directe - et les conséquences d'une activité cumulée au soi -

TABLEAU VII

ESTIMATION DES FACTEURS DE TRANSFERT DU ^{90}Sr AUX PRINCIPAUX VECTEURS ALIMENTAIRES

FACTEUR "RETOMBÉES" : $\text{pCi } ^{90}\text{Sr/gCa}$ par $\text{mCi } ^{90}\text{Sr/km}^2/\text{an}$

FACTEUR "SOL" : $\text{pCi } ^{90}\text{Sr/gCa}$ par $\text{mCi } ^{90}\text{Sr/km}^2$ (DEPOT CUMULE)

(d'après SCOTT RUSSEL) [19]

	Facteur "retombées"	Facteur "sol"
Lait	0,8 (0,78 - 1,01)	0,3 (0,10 - 0,28)
Céréales	20	0,5
Légumes feuilles	0,9	0,3
Légumes racines	0	0,9

TABLEAU VIII

VALEUR DU RAPPORT $\frac{^{90}\text{Sr/Ca}}{\text{REGIME ALIMENTAIRE DE L'HOMME}}$ POUR LA REGION PARISIENNE
 $\frac{^{90}\text{Sr/Ca LAIT}}{\text{(Département de Protection)}}$

1965	1,43
1966	1,77
1967	1,82
1968	1,89
1969	1,96
1970	1,90
1971	1,97
1972	2,19
1973	2,23
1974	2,07

contamination indirecte) et on conçoit que l'effet global puisse modifier le classement d'une voie de contamination au cours du temps. Ceci est encore illustré par la valeur du rapport

$$\frac{{}^{90}\text{Sr}/\text{Ca} \text{ (régime alimentaire de l'homme)}}{{}^{90}\text{Sr}/\text{Ca} \text{ lait de vache (produit dans la région étudiée)}}$$

L'UNSCEAR a proposé d'estimer la valeur de ce rapport à $1,4$ pour des régimes occidentaux [20]. On constate, cependant, que ce rapport évolue au cours du temps (tableau VIII) et une explication possible et partielle peut être faite avec l'hypothèse suivante :

- . la contamination des sols cultivés par le strontium 90 s'élimine moins rapidement que celle des sols en place, en raison de l'homogénéisation due au labour qui peut s'opposer à la migration vers les couches profondes. Les végétaux cultivés présentent, en conséquence, une contamination plus soutenue que celle des fourrages des prairies permanentes, d'où le sens de l'évolution de ce rapport. Bien entendu, si on évoque les changements incessants dans les pratiques agricoles (engrais, profondeur de travail des sols, origine et nature de l'affouragement), on conçoit aisément que d'autres hypothèses puissent être avancées.

VII - AUTRES VOIES DE TRANSFERT

Il existe d'autres voies de transfert mettant en jeu des processus uniquement physico-chimiques. Deux ont retenu notre attention sur le plan de la radioprotection :

- . le rapport $\frac{\text{eau de boisson}}{\text{eau de surface}}$ estimé à $0,2$ par FLETCHER [21] mais là, tous les processus de traitement des eaux devraient être analysés sous cet angle pour mieux apprécier cette barrière ;
- . le rapport $\frac{\text{sédiment}}{\text{eau}}$ qui dépend de la composition physico-chimique de l'eau - pour les eaux du Rhône, le K_d se situe entre 160 et 500 avec une moyenne de 300 - non seulement pour le strontium mais pour d'autres radionucléides; ceci montre l'importance de l'utilisation des eaux à des fins agricoles avec ou sans décontamination préalable.

CONCLUSION

La principale voie d'atteinte de l'homme par les isotopes radioactifs du strontium a pour support la contamination des constituants du régime alimentaire. Pour les aliments d'origine végétale, le sol constitue un réservoir qui peut maintenir durablement une contamination. Pour les aliments d'origine animale et plus spécialement le lait, il existe une barrière de protection due à la discrimination métabolique favorable au calcium.

Les modes de contamination directe ou indirecte et l'évolution dans le temps de leur importance relative, les pratiques agricoles changeantes, la technologie alimentaire, sont susceptibles d'influencer notablement les facteurs de transfert ou les paramètres de certains modèles. Il peut ne pas être inutile, dans ce sens, de reconsidérer au bout de quelques années les données quantitatives qui ont servi de base aux études de radioprotection relatives à un problème d'environnement donné.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] LEHR J.
Etude des contaminations radioactives de la chaîne alimentaire et du milieu ambiant (période 1961-1971) - Rapport Euratom EUR 5065 f, 1974 et communication personnelle.
- [2] BARBIER G. et coll.
Absorption des radioéléments des sols par divers légumes cultivés dans les conditions pratiques - Rapport CEA n° 1860, 1961.
- [3] BARBIER G. et coll.
Compte rendu d'expériences de plusieurs années sur l'absorption du strontium et du césium par les plantes cultivées - Rapport CEA n° 2159, 1962.
- [4] BARBIER G. et coll.
Etudes expérimentales de la contamination radioactive par l'eau d'irrigation de certaines plantes cultivées - Rapport CEA n° 2625, 1964
- [5] Institut National de la Recherche Agronomique et Commissariat à l'Energie Atomique
Etudes expérimentales de la contamination radioactive des cultures notamment par l'eau d'irrigation - C.R Acad. Agric. France, 1963 (8mai) 611-620
- [6] BITTEL R.
Discussion sur les facteurs favorables à une contamination radioactive des végétaux cultivés - Ann. Agron., 1965, 16 - 265-286
- [7] DELMAS J., GRAUBY A., DISDIER R.
Etudes expérimentales sur le transfert dans les cultures de quelques radionucléides présents dans les effluents des centrales électro-nucléaires. Aix-en-Provence, 14-18 mars 1973. AIEA, Vienne 1973, 321-332 - DS : Environmental behaviour of radionuclides released in the nuclear industry.
- [8] DELMAS J., DISDIER R., GRAUBY A., BOVARD P.
Radiocontamination expérimentale de quelques espèces cultivées soumises à l'irrigation par aspersion. DS : Symposium de radioécologie, Cadarache, 8-12 septembre 1969, 707-730
- [9] RIVERA J.
Strontium 90 and calcium in United States wheat, 1958-1961 - Radiol. Health Data, 1963, 4, 132-133.
- [10] COULON R.
Les mécanismes de la contamination des céréales (blé), conséquences sur la pollution des farines - DS : Symposium de radioécologie, Cadarache, 8-12 septembre 1969, 833-858
- [11] MARTIN R.P., NEWBOULD P. and RUSSEL R. S.
Discrimination between strontium and calcium in plants and soils - DS : Radioisotopes in scientific research 4 (R.C. Extermann, Ed.) Londres, Pergamon press, 1958, vol 4 p. 178
- [12] COULON R.
Contrôle de la pollution radioactive de la farine de blé - Union Agriculture, 1971, 325,
- [13] COULON R., MADELMONT C.
Douze années de contrôle de la pollution radioactive céréalière en France (en préparation).

- [14] COULON R.
Déposition of ^{90}Sr and contamination of milk. Proposition of a model of transfer.
Ds : 2nd international conference on strontium metabolism - Glasgow and Strontian,
16-19 august 1972. Conf-72 0818, 447-456.
- [15] MADELMONT C., BOUVILLE A., BECKHOLS R., COULON R.,
Paramètres de transferts régionaux de la contamination du lait par le strontium 90 et
le césium 137 (en préparation).
- [16] GARNER R.J.
A mathematical analysis of the transfer of fission products to cow's milk. - Health
phy., 1967, 13, 205-212
- [17] MONROE R.A., WASSERMAN R.H., COMAR C.L.
Comparative behaviour of strontium calcium and cesium potassium in the fowl. - Am.
J. Physiol, 1961, 200, 535 - 1961
- [18] BITTEL R.
Facteurs de concentration par rapport à l'eau (eaux douces de surface considérée
comme vecteur primaire de la contamination radioactive des produits animaux et végé-
taux consommés par l'homme - (communication personnelle).
- [19] RUSSEL R.S.
Radioactivity in human diet - Londres Pergamon Press, 1966.
- [20] NATIONS-UNIES - UNSCEAR
Rapport du Comité Scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayon-
nements ionisants, Volume I. Niveaux - New York, Nations Unies, 1974.
- [21] FLETCHER R., DOTSON W.L.
Hermes digital computer code for estimating regional radiological effects from
nuclear power industry - US report HEDL - TME - 71-168, 1971

Manuscrit reçu le 1 février 1977

*Edité par
le Service de Documentation
Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay
Boîte Postale n° 2
91190 - Gif-sur-YVETTE (France)*