Juillet 1999

A.C.R.O.

QUALITE RADIOLOGIQUE DES EAUX MARINES ET CONTINENTALES DU LITTORAL NORMAND

Synthèse des travaux 1997 / 1998

Gilbert PIGREE
A.C.R.O - Association pour le Contrôle de la Radioactivité dans l'Ouest
Laboratoire indépendant d'analyse de la radioactivité
138, rue de l'Eglise – 14200 Hérouville Saint Clair

IMPRIMER L'ÉTUDE COMPLÈTE

FICHE RÉSUMÉ

RECHERCHES

AGENCE DE L'EAU SEINE NORMANDIE

SOMMAIRE

SOMMAIRE **2**

PRÉSENTATION DU TRAVAIL ENGAGÉ EN 1997-1998 ..... **4**

RÉSUMÉ **8**

CONTEXTE **10**

LA RADIOACTIVITÉ, QU'EST-CE ? **17**

De l'atome au noyau... 17
Grandeurs et unités... 19
Du noyau à la radioactivité... 19
De la radioactivité naturelle à l'artificielle... 22

D'OÙ PEUT PROVENIR LA POLLUTION RADIOACTIVE ? **23**

Les retombées des essais atomiques atmosphériques 23
Les « incidents » et les « accidents » 24
Les retombées de l'accident de Tchernobyl *24*
Les rejets de l'industrie nucléaire civile et militaire 25
Les rejets des structures de recherche et médicales 26

LE MILIEU MARIN : ÉTAT DES LIEUX **28**

Quels sont les radioéléments artificiels détectés et d'où proviennent-ils ? 30
Note sur le comportement des radioéléments en milieu marin 32
La Flore marine : *Fucus serratus* 34
Résultats *35*
Sédiments et sables 44
Résultats *48*
Répartition spatiale *54*
Distribution verticale *59*
La Faune marine : Moules, Patelles... 61

Résultats *61*
BILAN POUR LE MILIEU MARIN 67
Résultats *67*

LE MILIEU AQUATIQUE CONTINENTAL : ÉTAT DES LIEUX 73

QUELS SONT LES RADIOÉLÉMENTS ARTIFICIELS DÉTECTÉS ET D'OÙ PROVIENNENT-ILS ? 75
LA DOUVE, LA VIRE, LA RISLE 76
Résultats *76*
LA SEINE 78
Résultats *78*
LA SAINTE HÉLÈNE 83
Résultats *83*
L'ORNE 86
Résultats *86*
BILAN DU MILIEU AQUATIQUE CONTINENTAL 88
Résultats *89*

CONCLUSION GÉNÉRALE 94

REMERCIEMENTS 98

ANNEXE 100

LEXIQUE 104

SIGLES : 104
EXPRESSIONS : 105

BIBLIOGRAPHIE 106

PRESENTATION DU TRAVAIL ENGAGE EN 1997-1998

Sollicité par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie/Direction des Rivages Normands, le travail engagé par l'A.C.R.O. s'inscrit dans une démarche d'évaluation de la qualité radiologique des eaux marines et continentales du littoral normand. Dans cette perspective, des mesures de radioactivité ont été effectuées, non pas à proximité d'un émissaire (environnement déjà très surveillé) mais à plus grande échelle puisqu'en milieu marin, plus de 640 km de côtes sont concernés. Il s'agissait de fournir un **bilan représentatif de l'état radioécologique**, pour une année, de l'environnement marin (le long des côtes normandes) et des principaux cours d'eau qui l'alimentent.

Cette étude s'est articulée autour de deux campagnes de prélèvement effectuées entre avril 97 et février 98 : l'une au printemps et l'autre, en automne-hiver. Ceci, afin de répondre au souhait de la Direction des Rivages Normands que de disposer d'un bilan représentatif d'une année. En effet, de nombreux facteurs peuvent influencer dans le temps les résultats obtenus pour un indicateur en un lieu donné. On peut citer en exemple : le cycle biologique des espèces étudiées, les variations des caractéristiques physiques du milieu (salinité, température, etc.), les variations d'activités rejetées par les installations nucléaires, l'évolution de la qualité des rejets, etc.. Aussi, pour restituer le plus fidèlement possible l'état d'un milieu, on conçoit aisément la nécessité de répéter l'exercice.

A chaque campagne, des prélèvements ont été effectués à la fois le long du littoral normand au cours de pêches à pied, de Cancale (Baie du Mont St Michel) au Tréport (limite de la Haute-Normandie), mais aussi dans des cours d'eau : la Risle, la Vire, la Douve, la Sienne, la Sélune, l'Orne, la Sainte Hélène, le Ru des Landes ou la Seine. Pour chacun des écosystèmes, divers constituants ayant la capacité de concentrer les substances polluantes recherchées ont été étudiés. Il s'agit pour le milieu marin des sédiments, des moules, des patelles et des algues brunes, et pour les cours d'eau, des sédiments et principalement des mousses aquatiques.

Concernant les polluants recherchés, nous n'avons mesuré que les radioéléments artificiels émetteurs d'un rayonnement gamma. L'intérêt de mesurer les «émetteurs gamma artificiels» est accrû par le fait qu'ils représentent la plupart des polluants courants, et que de nombreux travaux ont été menés sur leur devenir en relation avec leurs caractéristiques physico-chimiques. Parmi ceux-ci, une attention particulière a été portée sur l'iode 129 (^{129}I). Sa recherche, qui concernait initialement les algues brunes, a été étendue lors de la seconde campagne à l'ensemble des bio-indicateurs du milieu marin dans le but de mieux cerner sa répartition spatiale le long du littoral normand. Ce choix a été motivé par le fait que ce radioélément, apparu depuis une dizaine d'année dans les rejets de l'usine de retraitement de La Hague (unique terme source industriel), n'est étudié que depuis peu ; il y a donc beaucoup moins d'informations que pour les autres émetteurs gamma. De plus, cet élément peut contaminer de grandes étendues en raison de sa mobilité.

Le présent document fait la synthèse des travaux exécutés en 1997/98 dans le cadre de l'étude intitulée *qualité radiologique des eaux marines et continentales du littoral normand*. Afin d'améliorer la compréhension de l'étude, le contexte environnemental, la radioactivité et les sources de pollutions radioactives sont autant de thèmes préalablement abordés. La présentation des résultats est faite, quant à elle, en deux parties : l'une concerne le milieu marin, et l'autre, le milieu aquatique continental. Pour chacune des parties, après un bref rappel sur les radioéléments détectés, leur(s) provenance(s) et les prélèvements effectués (lieux et nature d'indicateurs étudiés), seuls les faits ou résultats saillants sont avancés par souci de clarté. De plus, un bilan synthétique termine chacune des parties et la conclusion générale s'intéresse aux limites et aux extensions possibles de ce travail.

Prélèvements à Luc sur Mer

Par ailleurs, il a été jugé utile de présenter quelques valeurs de comparaison ; plusieurs orientations étaient possibles : comparaison aux normes sanitaires en vigueur, comparaison aux concentrations d'isotopes radioactifs naturels ou comparaison aux teneurs de la radioactivité artificielle mesurées en d'autres lieux ou quelques années auparavant. Vu l'esprit qui a animé ce travail (à caractère radioécologique), la difficulté à rassembler les informations nécessaires à la veille sanitaire des populations (habitudes alimentaires par exemple) et la difficulté à définir des valeurs qui caractérisent les radioéléments naturels (selon le territoire, l'écosystème et le constituant de la biosphère étudié), nous avons choisi de présenter une comparaison des concentrations entre isotopes radioactifs artificiels. En milieu marin, nous rappelons des résultats acquis les années antérieures en des lieux et indicateurs similaires à ceux étudiés. Pour le milieu aquatique continental, nous faisons état de résultats de mesures effectuées en 1997 dans des cours d'eau importants et fortement industrialisés.

De cette manière, le lecteur pourra apprécier l'évolution des teneurs dans son environnement pour les radioéléments artificiels étudiés. De plus, des informations (d'ordre générale) concernant l'impact sanitaire des polluants mis en jeu sont rapportés en annexe.

RESUME

En milieu marin, des échantillons biologiques (algues brunes, patelles et moules), des sédiments fins immergés dans les ports et du sable de plage ont été collectés le long du littoral normand, de Cancale au Tréport, au cours de pêches à pied. En milieu continental, plusieurs cours d'eau (Seine comprise) qui alimentent les eaux côtières marines ont fait l'objet de prélèvements de sédiments et essentiellement de mousses dulçaquicoles (*Fontinalis*). Tous ces échantillons ont été collectés entre avril 1997 et février 1998.

Il s'en est suivi une recherche des radioéléments artificiels émetteurs gamma (^{129}I compris), ainsi qu'une détermination de la granulométrie, de l'activité en ^{40}K et de la teneur en carbone organique total (pour les échantillons prélevés en automne) pour les sédiments.

Les résultats acquis soulignent, pour le milieu marin, que la zone allant de Carteret à Fermanville est qualitativement et quantitativement plus marquée que le reste du littoral ; ce fait témoigne de la concentration d'industries nucléaires dans cette région et de conditions hydrodynamiques particulières. Cependant, les activités relevées chez les organismes marins consommables restent faibles. Pour les patelles, elles sont inférieures ou de l'ordre du Bq/kg frais pour les divers radioéléments détectés sauf pour (^{106}Ru/Rh). Pour les moules, aucune activité significative n'est relevée. De même, les activités massiques observées

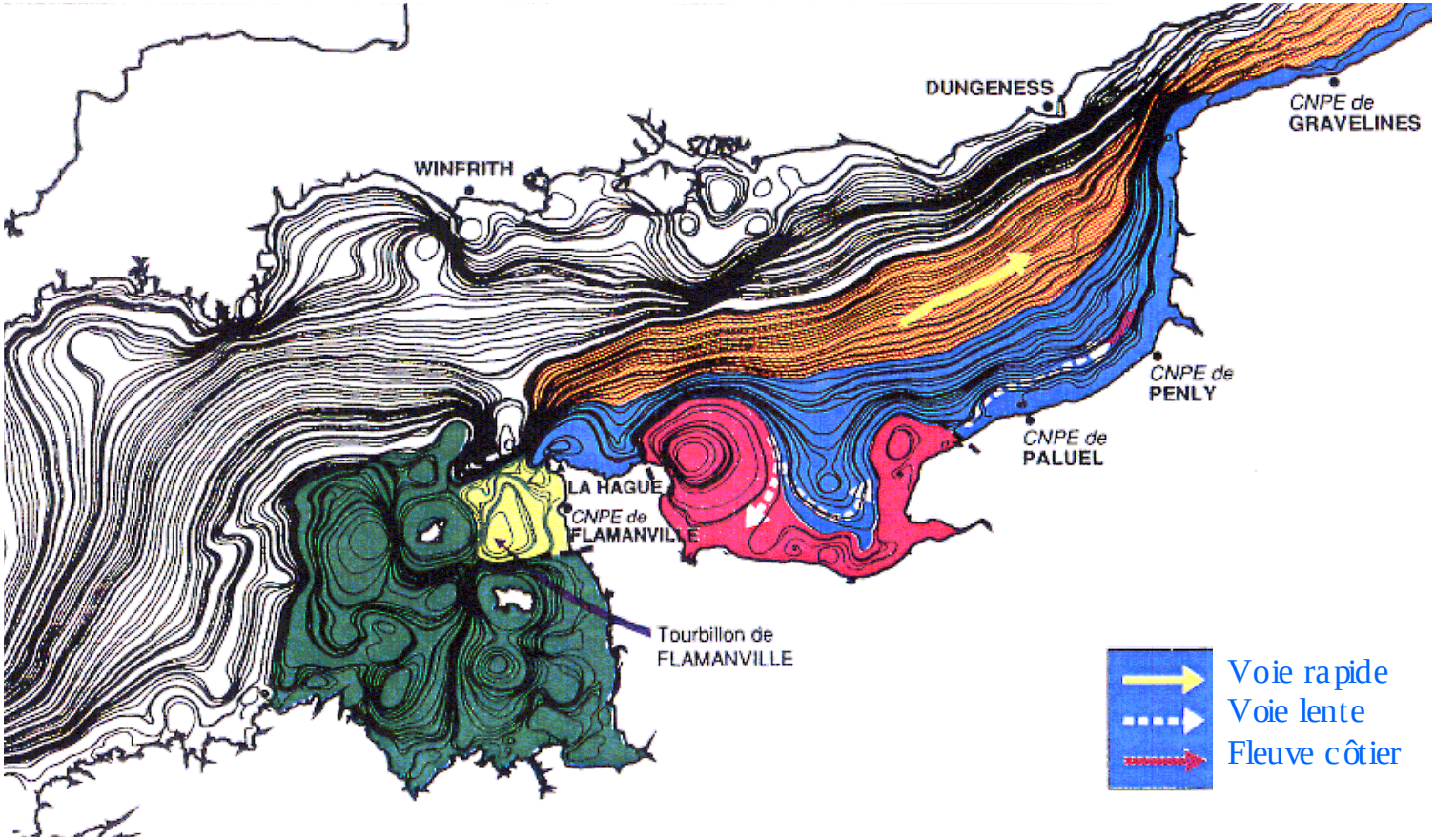
dans les sables de plages sont faibles (≤ 1 Bq/kg sec) ; un ordre de grandeur les sépare de celles relevées dans les sédiments.

Par ailleurs, à partir des résultats, des précisions sont apportées sur la distribution spatiale des radioéléments identifiés comme ^{129}I par exemple.

Pour les cours d'eau, les retombées des essais atmosphériques de l'arme atomique et de l'accident de Tchernobyl sont encore nettement visibles dans les sédiments par la présence de ^{137}Cs à des niveaux de l'ordre de 10 Bq/kg sec. En outre, les résultats soulignent, au delà d'une influence industrielle géographiquement limitée et connue, une contribution des pratiques médicales (^{131}I) au marquage du milieu aquatique continental ; contribution que l'on peut qualifier du terme «source diffuse».

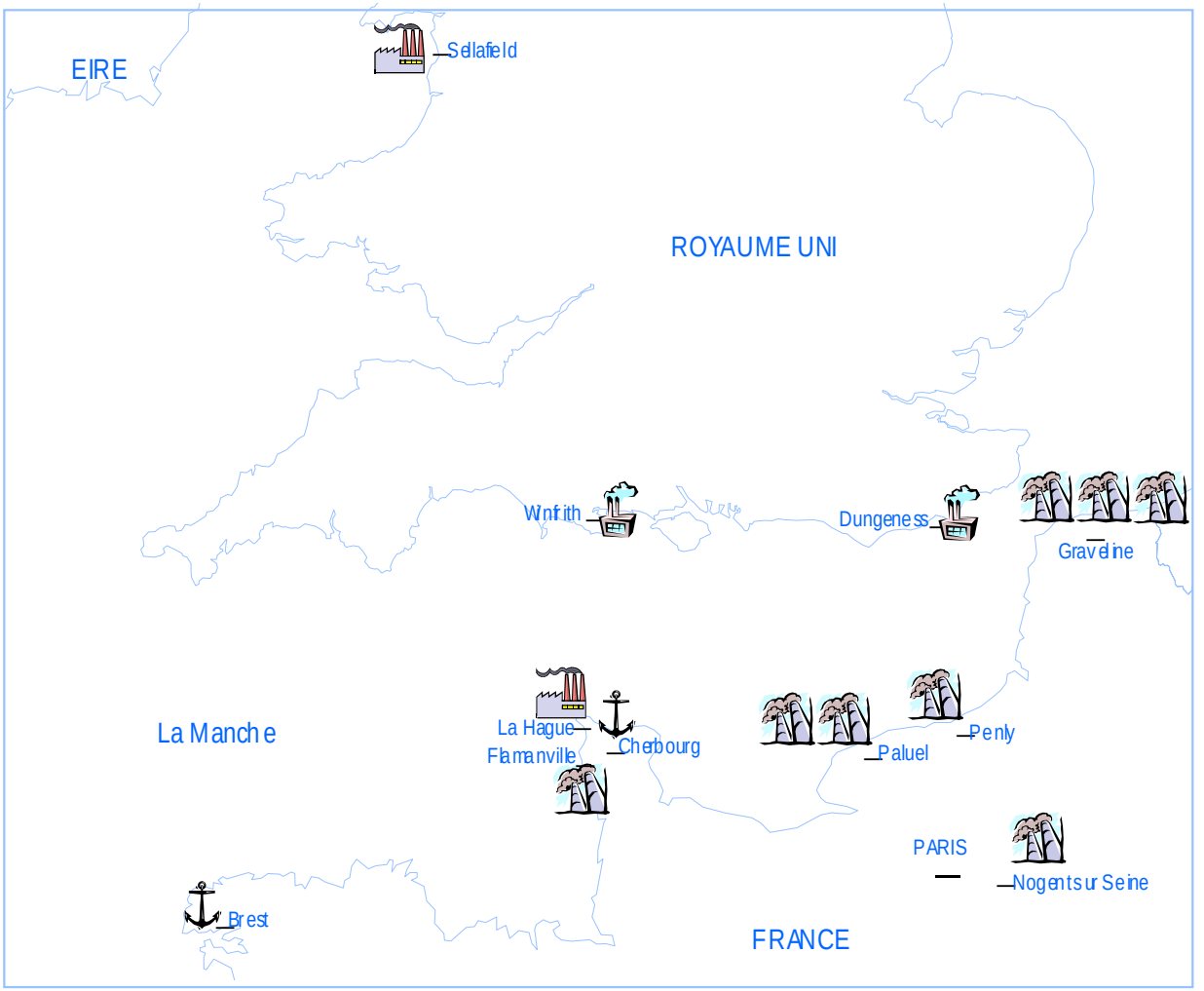
CONTEXTE

Zone de transit des eaux atlantiques vers la mer du Nord, la Manche est en perpétuelle renouvellement par l'Ouest. La circulation des masses d'eau y est complexe mais l'existence d'un flux principal qualifié de «fleuve central» et de mouvements tourbillonnaires plus ou moins marqués en zone côtière française, du golfe Normand-Breton à la baie de Seine, a été démontrée (Salomon et Breton, 1990). De même, plus à l'est, l'existence constante de structures frontales longeant le littoral depuis Fécamp jusqu'au Pas de Calais a aussi été observée (Dupont *et al.*, 1990). Ce fait est à mettre en relation avec l'existence d'un «fleuve côtier», confirmé par l'étude de la distribution des concentrations en $^{134 \text{ et } 137}$Cs dans les eaux de la Manche (Guéguéniat *et al.*, 1988), qui permet le transit en mer du Nord des eaux continentales qui l'alimentent et plus particulièrement de celles de la Seine.



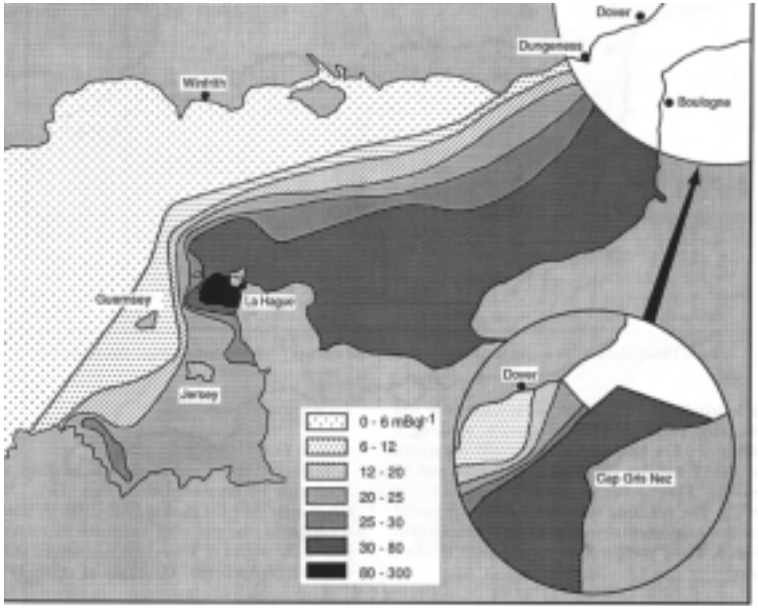
Identification des masses d'eau à partir de leurs trajectoires (vent d'Ouest – Sud-Ouest).
Source : Masson 1997a

Outre ces aspects hydrodynamiques, la Manche est une ressource vivante, siège d'activités permanentes comme la pêche et les cultures marines et d'activités saisonnières comme le tourisme littoral. Elle est également, comme toute masse d'eau qui baigne les côtes d'un pays peuplé et industrialisé, un exutoire pour toute sorte d'effluents, qu'ils soient issus de l'agriculture, de la collectivité ou de l'industrie, y compris de l'industrie nucléaire. A ce titre, la Manche et plus particulièrement les eaux du littoral normand recueillent les rejets d'effluents liquides d'installations nucléaires côtières depuis 1966. D'abord, avec la construction de l'usine de retraitement de La Hague et du Centre de Stockage de la Manche (Cotentin), puis, avec la création de l'arsenal à Cherbourg, et finalement, avec la mise en service des centrales électronucléaires de Flamanville, de Paluel et de Penly (soit huit réacteurs à eau pressurisée au total). Mais les eaux du littoral normand n'en sont pas moins influencées par d'autres sources. Le réseau hydrographique, dense, draine des substances radioactives consécutives aux retombées antérieures et postérieures à l'accident de Tchernobyl mais également aux rejets de diverses structures, qu'elles soient hospitalières, de recherche ou industrielles. De même, les eaux atlantiques qui pénètrent en Manche présentent une radioactivité artificielle rémanente.



REP (x2) : Réacteur à Eau Pressurisée
Usine de retraitement de combustibles irradiés
Arsenaux
Réacteurs électronucléaires (différents des REP)

Sous la poussée des eaux atlantiques, un rejet pratiqué à La Hague d'un élément conservatif[0] (ex : ^{125}Sb) se disperse essentiellement vers le nord-est où la distribution des concentrations est stucturée en bandes parallèles avec un fort gradient de décroissance des eaux françaises vers les eaux anglaises. De plus, si pour un élément conservatif, la quasi-totalité de la quantité émise aura quitté la Manche une année après, en revanche pour des éléments non conservatifs comme ^{106}Ru ou ^{60}Co, l'essentiel aura quitté l'eau de mer pour se fixer sur les sédiments ou les espèces vivantes. (Bailly du Bois *et al.*, 1995)

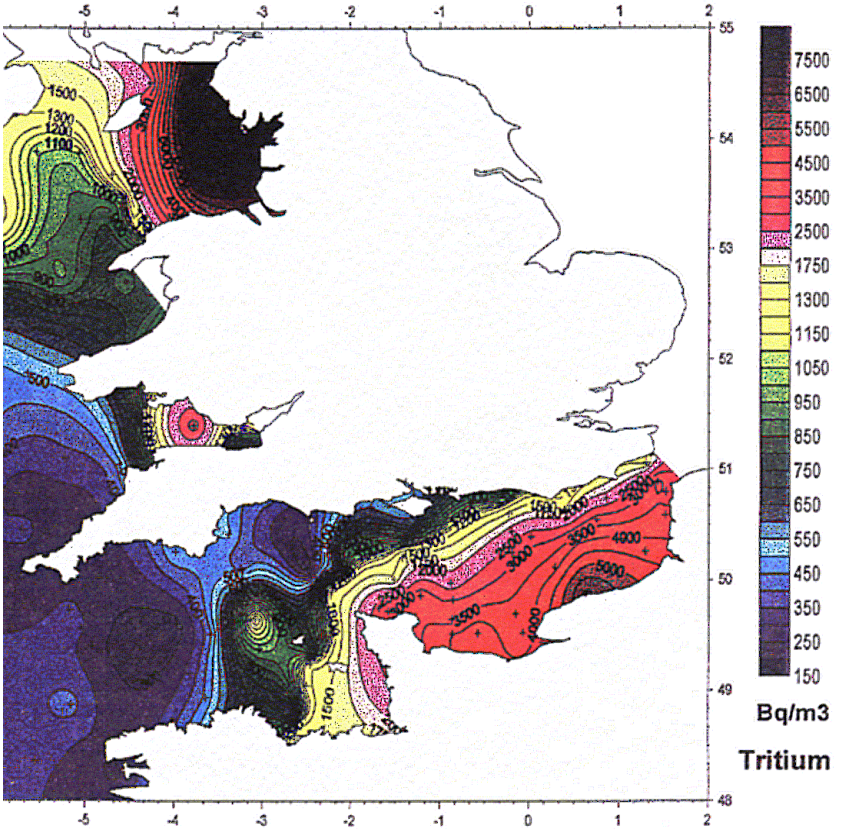


Distribution des activités de l'antimoine 125 (^{125}Sb) en Manche durant juin 1986 (en Bq/m^3).
Source : Guéguéniat et al., 1994

[0] Cf. lexique

Cette sollicitation accrue de l'eau, qu'elle soit marine ou continentale, comme vecteur «d'élimination» nous amène à considérer un marquage des différents écosystèmes aquatiques (et de leurs constituants) spécifiquement lié à ces apports de nature anthropogéniques. Par marquage, nous entendons la présence de radioéléments en sus de la composition et/ou de la concentration normalement observable. Il s'ensuit par conséquent une surveillance radiologique, dans un cadre réglementaire souvent peu connu de tous. Cette surveillance vise à vérifier que ce que l'on mesure dans l'eau, dans les sables et sédiments, les algues, la flore côtière, les poissons, les mollusques et coquillages, est inférieur aux normes[1]. Elle s'exerce principalement dans le champs proche des émissaires de rejets ; dans le champ moyen, il y a peu de contrôles, et les résultats proviennent essentiellement d'études faites en radioécologie.

[1] Expression empruntée à Guéguéniat et al, RGN, 1992



Cartographie des concentrations en tritium (^{3}H) en Manche en 1994, campagne Gédymac 28/08 – 13/09/1994. Source Masson, 1997a

LA RADIOACTIVITE, QU'EST-CE ?

DE L'ATOME AU NOYAU…

Unité de matière ou plus petite partie d'un corps pur, **l'atome** est constitué d'un noyau autour duquel gravite un ou plusieurs **électrons** qui forment un « nuage » appelé aussi « cortège électronique » ; le noyau est chargé positivement et les électrons négativement, de telle sorte que l'ensemble est neutre.

Dans la nature, **on connaît 92 éléments différents (ou corps pur),** allant de l'hydrogène (le plus léger) à l'uranium (le plus lourd), qui ne peuvent être ni décomposés en substance plus simple, ni synthétisés à partir de réactions chimiques ordinaires.

Le noyau est quant à lui un assemblage de **protons** et de **neutrons** ; ces deux particules de masses voisines sont également appelées **nucléons**. Par convention, le nombre total de nucléons est appelé « nombre de masse » **(A)** alors que le nombre de protons est appelé « numéro atomique » **(Z)**. En fait, l'élément est caractérisé du point de vue chimique par le nombre de protons (Z) et du point de vue nucléaire, par le nombre de nucléons (A). Ainsi, deux éléments

ayant le même nombre Z et un nombre A différent sont appelés **isotopes** ; ils ont les mêmes propriétés chimiques mais des propriétés nucléaires différentes.

Notation courante :	isotope stable du carbone	isotope radioactif du carbone
${}^{A}_{Z}X$	${}^{12}_{6}C$	${}^{14}_{6}C$

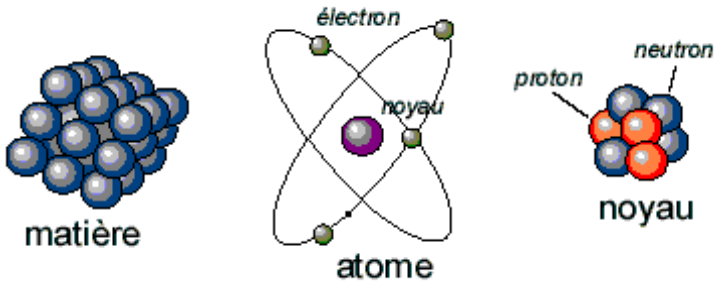


Figure 1 : De la matière au noyau

GRANDEURS ET UNITES…

Grandeur	Unité	Définition
Période physique ou demi-vie ($T_{1/2}$)	seconde, minute, jour ou année	Représente le temps au bout duquel la masse d'un radioélément a été divisé par deux.
Activité	Becquerel (Bq)	1 Bq = 1 désintégration par seconde Correspond au nombre de radioéléments qui se désintègrent par unité de temps. Nota : le curie (Ci) est l'ancienne unité : 1Ci = 37GBq
Dose absorbée	Gray (Gy) 1 Gy = 1 joule / kg	Quantité d'énergie absorbée par la matière vivante ou inerte et par unité de masse.
Dose efficace	Sievert (Sv) 1 mSv = 0,001 Sv	Cette grandeur, proche de la dose absorbée, tient compte de la nature des rayonnements et de la manière dont la dose est reçue. Elle traduit les dommages radiologiques occasionnés. La réglementation européenne (et très bientôt la réglementation française) fixe une limite annuelle de 1 mSv pour le public

1 TBq = 10^{12}Bq= mille milliard de Bq
1 GBq = 10^{9}Bq = 1 milliard de Bq
1 MBq = 10^{6} Bq= 1 million de Bq
1 kBq = 10^{3} Bq= mille Bq

DU NOYAU A LA RADIOACTIVITE…

La **radioactivité** est le résultat de la **transformation spontanée du noyau** de l'atome ; seuls les noyaux dits « instables » sont concernés. Avant cette transformation, appelée aussi désintégration, on parle de **noyau père,** après, de **noyau fils.** Il peut y avoir plusieurs transformations successives avant d'arriver

à un noyau stable ; on parle alors de **chaîne de désintégration.** Lors d'une désintégration, il y a **émission d'un rayonnement ;** c'est ce rayonnement qui constitue le phénomène de radioactivité. On observe couramment trois types de rayonnements émis. D'abord, le **rayonnement alpha (α)** qui correspond à l'éjection d'un noyau d'hélium (particule). Puis, le **rayonnement bêta (β)** qui correspond à l'éjection d'un électron (β^-) ou d'un positon (β^+). Et finalement, le **rayonnement gamma (γ)** qui correspond à l'émission d'un rayonnement analogue à la lumière mais beaucoup plus énergétique. Dans ce dernier cas de figure, le noyau n'est pas transformé et bien souvent le rayonnement γ est associé à un rayonnement α ou β.

Exemple de chaîne de désintégration

Iode 137
25 secondes
↓ β
Xenon 137
3,8 minutes
↓ β
Césium 137
30 ans
↓ β
Baryum 137m
2,5 minutes
↓ γ
Baryum 137 (stable)

Tous ces rayonnements ont un point commun ; ils peuvent ioniser la matière qu'ils traversent, c'est-à-dire lui arracher des électrons. Ce sont ces ionisations qui, dans la matière vivante, seront à la base même des dégats biologiques dits «radioinduits».

Par ailleurs, lorsqu'un élément est déclaré radioactif, on parlera plus volontiers de **radioélément** ou de **radionucleide**. Si plusieurs éléments ayant exactement les mêmes propriétés chimiques (Z identique) sont radioactifs, on parlera alors de **radio-isotopes.**

Radioéléments		Nature	Période	Emission
^{3}H	tritium	nat, PFT	12,33 a	β^-
^{14}C	carbone 14	nat, PFT, PA	5730 a	β^-
^{40}K	potassium 40	nat	$1,26\ 10^{9}$ a	e^-, β^-, γ
^{54}Mn	manganèse 54	PA	312,2 j	e^-, γ, x
^{58}Co	cobalt 58	PA	70,78 j	β^+,γ
^{60}Co	cobalt 60	PA	5,27 a	β^-,γ
^{106}Ru	ruthénium 106	PF	372,6 j	β^-
^{110m}Ag	argent 110m	PA	249,8 j	β^-,γ
^{129}I	iode 129	PF	$1,57\ 10^{7}$ a	e^-, β^-,γ
^{131}I	iode 131	PF	8,0 j	e^-, β^-,γ
^{134}Cs	césium 134	PF	2,07 a	β^-,γ
^{137}Cs	césium 137	PF	30,1 a	e^-, β^-
^{232}Th	thorium 232	nat	$10,40\ 10^{10}$ a	e^-, α, γ, x
^{235}U	uranium 235	nat	$7,1\ 10^{8}$ a	α,γ, x
^{238}U	uranium 238	nat	$4,5\ 10^{9}$ a	α,γ, x
^{239}Pu	plutonium 239	T	$24,2\ 10^{3}$ a	α,γ, x
^{241}Am	américium 241	T	432 a	α,γ, x

nat : naturel ;
PF : produit de la fission ;
PA : Produit d'Activation ;
T : Transuranien ;
PFT : Produit de Fission Ternaire

Tableau 0 : Caractéristiques physiques de quelques radioéléments courants.

Cédérom " Recueil des résultats d'études financées par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie "

DE LA RADIOACTIVITE NATURELLE A L'ARTIFICIELLE…

La radioactivité est présente naturellement dans l'environnement et on peut distinguer les **« cosmogéniques »** (ex : ^{3}H et ^{14}C) fabriqués en permanence par interaction des rayonnements cosmiques sur des noyaux stables légers, des **« primordiaux »** et de leurs descendants (ex : ^{238}U, ^{232}Th et ^{40}K) présents sur la Terre depuis l'origine des temps. Cependant, depuis 1934, l'homme a la possibilité de créer des noyaux qui n'existent pas dans la nature. Il s'agit de radioéléments artificiels. Généralement, ils sont classés en trois catégories : les **produits d'activation** (ex : ^{60}Co et ^{54}Mn) obtenus suite à la capture d'un ou plusieurs neutron(s), les **produits de fission** (ex : ^{106}Ru, ^{129}I et ^{137}Cs) qui résultent de la fragmentation de l'uranium 235 ou du plutonium 239 et finalement, les **transuraniens** (ex : ^{241}Am et ^{241}Pu) qui correspondent aux éléments plus lourds que l'uranium. (voir tableau ci-contre)

Il faut remarquer que les radioéléments naturels peuvent être produits par l'homme ; par exemple, l'utilisation civile et militaire de l'énergie nucléaire a introduit de grandes quantités de ^{3}H et de ^{14}C dans l'environnement.

D'OU PEUT PROVENIR LA POLLUTION RADIOACTIVE ?

Plusieurs sources sont à considérer dans l'espace et le temps pour expliquer la présence de radioéléments artificiels dans les eaux marines et continentales étudiées. Il s'agit des retombées des tirs expérimentaux d'armes nucléaires, des rejets continuels et autorisés d'installations industrielles, de recherches et médicales, mais également d'incidents divers ou d'accidents comme celui de Tchernobyl. De même, principalement pour le milieu marin, des sources qualifiées de latentes existent. Elles résultent de la perte de matériaux radioactifs et de l'immersion, contrôlées ou non, de déchets nucléaires.

LES RETOMBEES DES ESSAIS ATOMIQUES ATMOSPHERIQUES

De 1945 à 1980, 423 essais de l'arme atomique auraient été conduits en atmosphérique (Guéguéniat *et al,* 1996) ; l'essentiel des tirs ayant eu lieu entre 1951 et 1962. Ces tirs aériens ont libéré de grandes quantités de radioéléments sous la forme d'aérosols qui se sont principalement déposé à la surface de l'hémisphère Nord où la plupart des essais ont eu lieu (Amiard-Triquet C. et Amiard J.C., 1980). Si une grande partie des radioéléments émis a aujourd'hui disparu parce qu'ils étaient de courte période, en revanche, on observe un marquage persistant par diverses substances radioactives[2], parmi lesquelles figurent deux émetteurs gamma artificiels. Il s'agit principalement du césium 137 (^{137}Cs) et, dans une moindre mesure, de l'américium 241 (^{241}Am).

---

[2] ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{239}Pu, ^{240}Pu, ^{3}H, ^{14}C, ^{241}Am, ^{237}Np, etc.

LES « INCIDENTS » ET LES « ACCIDENTS »

Dans le cadre de l'utilisation civile et militaire de l'énergie nucléaire, certains incidents et accidents peuvent aboutir à des rejets non contrôlés dans l'environnement donnant naissance à une contamination locale plus ou moins aiguë (voir encadré), parfois associée, à une contamination plus faible mais sur de grandes étendues (ex : Tchernobyl). En fonction de la période des radioéléments mis en jeu (phénomène de décroissance), de leurs caractéristiques physico-chimiques et des propriétés du milieu affecté à disperser les polluants (phénomène de dilution), les répercussions de ces événements peuvent être ponctuelles ou perdurer dans le temps.

Remarque : A titre de comparaison, l'activité totale relâchée a pu être estimée à 2500 000 000 TBq dont 900 000 TBq pour le seul ^{137}Cs. (Colloque RADOC, oct. 1996).

Les retombées de l'accident de Tchernobyl

L'accident de la centrale de Tchernobyl survenu le 26 avril 1986 a donné lieu à une émission très importante de radionucléides : environ 13 millions de TBq d'aérosols et de gaz radioactifs auxquels s'ajoutent 2000 TBq de tritium (Colloque RADOC, oct. 1996). Il s'en est suivi des dépôts, essentiellement sous forme humide, qui ont affecté toute la France avec un gradient décroissant d'Est en Ouest. Aujourd'hui, on observe toujours un marquage des écosystèmes principalement dû au ^{137}Cs. En Manche, l'activité en ^{137}Cs originaire des retombées de Tchernobyl et présente dans l'eau a pu être estimée à 13 TBq à la fin 1986 (P. Bailly du Bois *et al.*, 1997).

La perte de matière radioactive au cours de l'opération de détartrage menée, à partir de début juillet 1997, sur la canalisation de rejet en mer de l'usine de retraitement de la Hague (Nord-Cotentin) a affecté les fonds marins proches de l'exutoire. La zone concernée serait de 1900 m^2 et l'activité totale (^{90}Sr et alpha compris) est estimée à 15,5 GBq (Cogéma La Hague, communication du 28/09/98).

Ces matières radioactives, présentent sous la forme d'un amalgame à base de silice dénommé « tartre », constituent une source latente en attente de leur reprise.

LES REJETS DE L'INDUSTRIE NUCLEAIRE CIVILE ET MILITAIRE

Une autre part du marquage des eaux marines et continentales est due aux rejets d'effluents liquides radioactifs des installations nucléaires ; rejets effectués après traitement, contrôle et éventuellement dilution. Les eaux côtières du littoral normand, sont principalement concernées par les rejets de l'usine de retraitement des combustibles irradiés de La Hague et dans une moindre mesure par ceux des centrales de Flamanville, de Paluel et de Penly (cf. tableau 1). Les rejets se composent de produits de fission et d'activation, associés, dans le cas de l'usine de retraitement de La Hague, à des émetteurs alpha (ex : transuraniens). Une autre source de rejets radioactifs, généralement oubliée, est l'arsenal de Cherbourg ; nous n'avons pas d'information à son sujet[xx].

[x] Pour la première fois, rompant avec une longue tradition de silence, l'Etat Major de la Marine a accepté de fournir les niveaux de rejets de l'Arsenal de Cherbourg. Le Comité Radioécologique Nord-Cotentin doit en assurrer la publication d'ici peu.

Pour les eaux continentales alimentant les eaux côtières du littoral normand, peu d'entre elles sont concernées. La Seine, reçoit les rejets radioactifs (produits de fission et d'activation) de la centrale de Nogent sur Seine située en amont de Paris. Sur le plateau de La Hague (Nord-Cotentin), les cours d'eau Sainte Hélène et Grand Bel sont influencés par le Centre de Stockage de la Manche (CSM) où sont entreposés un peu plus de 525 000 m^3 de déchets radioactifs. (Cf. encadré p. 30)

LES REJETS DES STRUCTURES DE RECHERCHE ET MEDICALES

Le sujet est tellement vaste qu'il est difficile de dresser un inventaire. De plus, nous ne disposons pas d'information sur les activités rejetées. Aussi, nous ne présentons par la suite que le cadre général.

Hors industrie nucléaire, diverses structures peuvent avoir recours à l'utilisation de sources non scellées qui contiennent des radio-isotopes artificiels ; dans ces conditions, des rejets d'effluents liquides radioactifs sont tolérés dans le respect, par les utilisateurs, d'un dispositif réglementaire[3]. Les principaux sites concernés sont les structures hospitalières au sein desquelles le(s) service(s) de Médecine Nucléaire, le(s) laboratoire(s) d'analyse isotopique et/ou le(s) laboratoire(s) de recherche sont des lieux de mises en œuvre de radio-isotopes, souvent de

[3] Avis du 6 juin 1970, arrêté du 30 octobre 1981 relatif aux conditions d'emploi des radioéléments artificiels utilisés en sources non scellées à des fins médicales ou dispositions particulières accordées par la Commission Interministérielle des RadioEléments Artificiels (CIREA).

courtes périodes[4], dans les conditions précitées. Existent également les structures universitaires dans le cadre de l'enseignement et les centres de recherche comme celui du CEA/Saclay (Sud-Ouest de Paris) ; centre qui dispose d'une autorisation de rejets en milieu naturel pour des effluents radioactifs liquides contenant du tritium et des émetteurs alpha et bêta-gamma[5].

Concernant les rejets d'effluents liquides, ils s'effectuent généralement dans le réseau d'assainissement.

	^{54}Mn	^{58}Co	^{60}Co	^{106}Ru/Rh	^{110m}Ag	^{129}I	^{131}I	^{137}Cs	^{241}Am
Usine de retraitement de La Hague	48,1	16,5	485	19600	**Nd** (0,014)	1630	7,94	2460	6,10
Flamanville	0,03	0,51	1,10	-	0,39	-	0,02	0,42	Interdit
Paluel	0,19	2,4	1,7	-	0,57	-	0,01	0,13	Interdit
Penly	0,06	0,22	0,40	-	0,54	-	0,006	0,24	Interdit
Nogent sur Seine	0,13	0,84	1,30	-	0,45	-	0,005	0,12	Interdit

Tableau 1 : Activités (GBq) de quelques radioéléments artificiels émetteurs gamma identifiés dans les effluents liquides rejetés en 1997 par les installations nucléaires présentes sur le bassin Seine-Normandie.

Nota : Pour ^{110m}Ag, il n'est pas détecté en 1997 dans les rejets de l'usine de retraitement de La Hague, la valeur se situant sous le seuil de détection. N'ayant pas connaissance du seuil, nous présentons l'activité mesurée en 1995.«nd» signifie non décelé.

---

[4] Parmi les émetteurs gamma artificiels, on peut citer principalement l'iode 131($T_{1/2}$= 8j) puis le technétium 99 métastable ($T_{1/2}$= 6h), l'indium 111 ($T_{1/2}$= 2,8j), les isotopes 123 ($T_{1/2}$= 13h) et 125 ($T_{1/2}$= 60j) de l'iode, le thallium 201 ($T_{1/2}$= 3j) et le cobalt 57 ($T_{1/2}$= 272j).

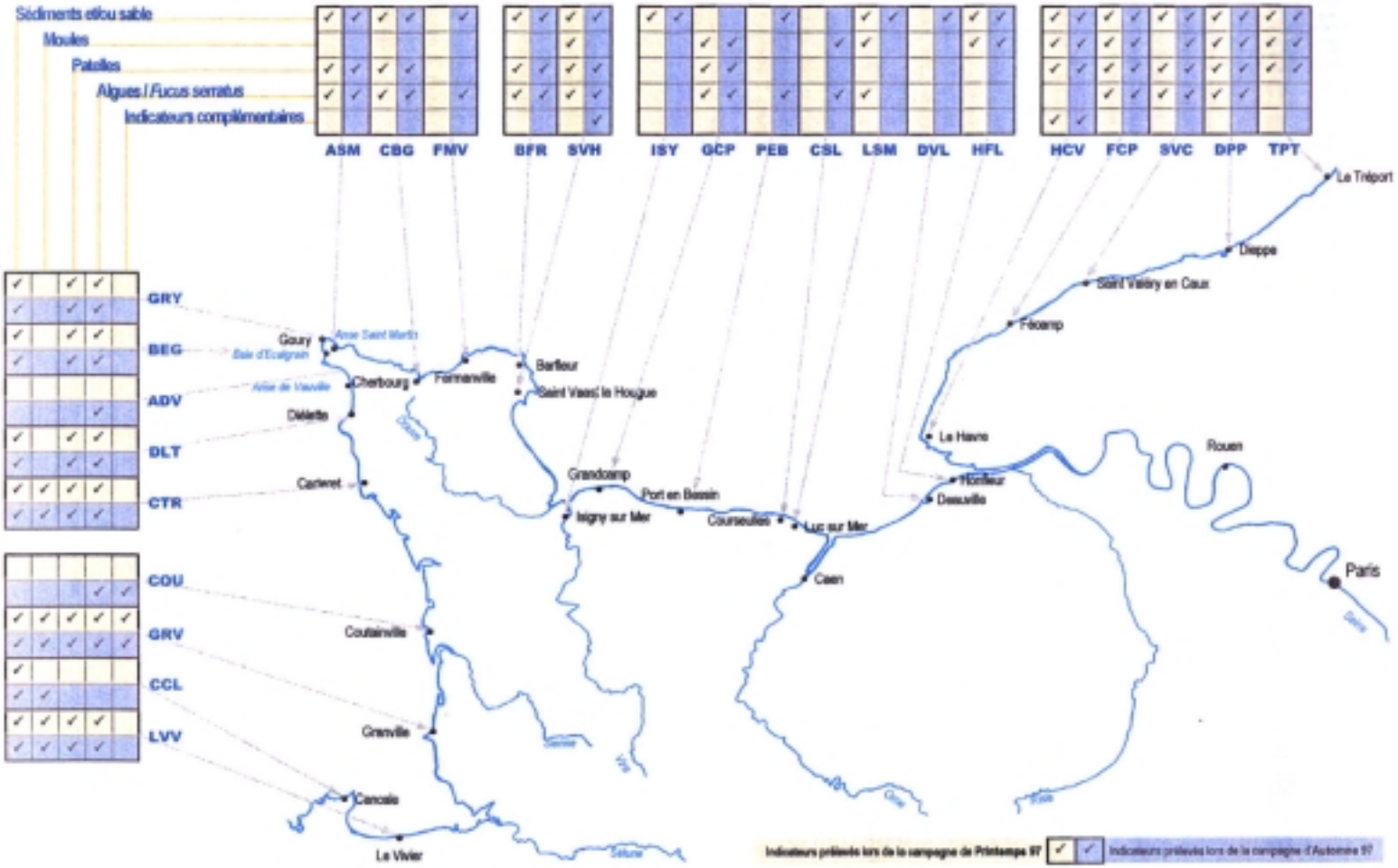
[5] *L'environnement,* supplément trimestriel du journal CEA/Saclay.

LE MILIEU MARIN : ETAT DES LIEUX

Prélèvements effectués le long du littoral normand
Les radioéléments artificiels détectés et leur provenance
Note sur le comportement des radioéléments

Résultats

- La flore marine : *Fucus serratus*
- *Sédiments et sables*
- La faune marine : Moules, Patelles...
- Bilan du milieu marin



Carte 1 : Prélèvements effectués le long du littoral normand lors des campagnes de Printemps et d'Automne 1997

QUELS SONT LES RADIOELEMENTS ARTIFICIELS DETECTES ET D'OU PROVIENNENT-ILS ?

Parmi les radioéléments artificiels émetteurs gamma recherchés dans le milieu marin, huit ont été détectés (cf. tableau 2).

Tableau 2 : Radioéléments artificiels détectés le long du littoral normand.

Dénomination		Période
manganèse 54	^{54}Mn	312 j
cobalt 60	^{60}Co	5,3 a
ruthénium 106	^{106}Ru	373 j
argent 110m	^{110m}Ag	250 j
iode 129	^{129}I	15 700 000 a
iode 131	^{131}I	8 j
césium 137	^{137}Cs	30 a
américium 241	^{241}Am	433 a

Nous présentons par la suite l'origine la plus probable sans pour autant discriminer l'influence et les apports relatifs de toutes les sources. De plus, l'arsenal de Cherbourg n'est pas pris en compte.

^{241}Am et ^{137}Cs proviennent à la fois de pratiques industrielles nucléaires et à la fois des retombées des essais atomiques atmosphériques associées à celles de l'accident de Tchernobyl dans le cas du ^{137}Cs. La radioactivité artificielle rémanente ne provenant pas des installations nucléaires côtières constitue un «bruit de fond» et concerne de manière variable tous les compartiments de

l'environnement (eau, sédiments, algues, etc.). Ainsi, les eaux de l'Atlantique[6] qui pénètrent en Manche et celles du réseau hydrographique constituent un apport de ^{137}Cs à ne pas négliger.

Concernant, l'origine industrielle (côtière) de ces radioéléments, ^{241}Am est exclusivement rejeté par l'usine de retraitement des combustibles irradiés de La Hague[7] alors que ^{137}Cs est rejeté à la fois par l'usine de retraitement et, dans une moindre mesure, par les centrales nucléaires (cf. tableau 1 page 9). De plus, une contribution des rejets de l'usine de retraitement de Sellafield (Grande Bretagne) en Mer d'Irlande est avancée mais reste non prouvée pour l'instant (Bailly du Bois *et al.*, 1997).

Pour les autres radioéléments (sauf ^{131}I), absents du bruit de fond, leur présence est à relier aux pratiques industrielles nucléaires côtières. Deux familles peuvent alors être distinguées. ^{129}I et ^{106}Ru proviennent exclusivement du retraitement alors que ^{54}Mn, ^{60}Co et ^{110m}Ag ont une origine double : retraitement et production électronucléaire. Dans le cadre de l'étude, ^{110m}Ag témoignerait des rejets des centrales nucléaires alors que ^{60}Co et ^{54}Mn seraient principalement attribuables à ceux de l'usine de retraitement des combustibles irradiés de La Hague sauf dans

---

[6] Pour plus d'information, se référer à *Radionuclides in the oceans, Inputs and Inventories* par P. Guéguéniat, P. Germain et H. Métivier, IPSN, éditions de physique, septembre 1996.

[7] L'usine de retraitement est la seule installation nucléaire côtière à posséder une autorisation de rejet pour les émetteurs alpha dont l'américium 241 fait partie.

la zone d'influence des centrales où la discrimination devient délicate à faire. En Haute-Normandie, il y a interférence pour ^{60}Co entre les rejets des centrales de Paluel et de Penly et ceux de l'usine de La Hague.

En ce qui concerne ^{131}I, sa présence serait liée à son utilisation à des fins médicales ; utilisation qui donne lieu, comme pour les pratiques précédentes, à des rejets. Suite à son introduction dans le réseau de collecte des eaux usées, ^{131}I va être en partie libéré dans les eaux marines avec les effluents traités par la station d'épuration de l'agglomération concernée.

NOTE SUR LE COMPORTEMENT DES RADIOELEMENTS EN MILIEU MARIN

Le comportement général des radioéléments en milieu marin dépend, entre autre, de leur forme physico-chimique au moment de leur introduction dans l'eau de mer ; celle-ci pouvant évoluée par la suite : par exemple, depuis 1991, près de la moitié du ^{106}Ru déversé en mer - par l'usine Cogéma-La-Hague - est hydrolysé pendant le transit des masses d'eau entre Goury et Cherbourg (Gandon *et al.*, 1994). La physico-chimie des éléments est, quant à elle, tributaire des procédés d 'épuration appliqués aux effluents ; procédés ayant notablement évolués au fils des années. En outre, les caractéristiques de l'effluent (pH, composition chimique, etc.) influencent le comportement des radioéléments rejetés ; pour information, l'usine de retraitement a rejeté en 1996 3740t de nitrate, 71t de nitrite, 6,2t de tributhyl-phosphate (TBP),...

Après introduction dans l'eau de mer, la réactivité biologique des radioéléments peut être appréciée au travers des facteurs de concentration -Fc- (Cf. tableau 3). De même, leur affinité pour la phase dissoute (eau) ou pour la phase particulaire (matière en suspension et sédiments) peut être estimée à partir des coefficients de distribution -Kd- (Cf. tableau 3). Ces grandeurs qui résultent (en partie) d'observations faites dans l'environnement, peuvent être brièvement définis comme étant le rapport entre l'activité massique du polluant dans l'organisme ou le sédiment et son activité massique dans l'eau de mer ambiante.

Tableau 3: Facteurs de concentration (Fc) et coefficients de distribution (Kd) en milieu marin ; valeurs recommandée par le Groupe de Travail n°3 (GT3) du Comité Radioécologie Nord-Cotentin

	Mollusques (Moules / Patelles)	Algues	Sédiments
	Fc (L/kg frais)	Fc (L/kg frais)	Kd (L/kg sec)
Manganèse	10 000	5 000	1 000
Cobalt	2 000	6 000	40 000(*)
Ruthénium	600	300	5 000
Argent	40 000	5 000	1 000
Iode	100	10 000	500
Césium	50	50	1 000
Américium	1 000	400	30 000

(*) Facteur de transfert avec intégration ; période de 5 ans.

Si on regroupe les radioéléments (mesuré dans l'étude) en fonction de leur degré d'affinité avec les particules, deux groupes peuvent être définis* à partir de l'état actuel de la connaissance :

- Radionucléides principalement solubles : ^{137}Cs, ^{129}I, ^{131}I et ^{106}Ru.
- Radionucléides principalement particulaires : ^{110m}Ag, ^{241}Am, ^{54}Mn, ^{58}Co et ^{60}Co.

LA FLORE MARINE : *FUCUS SERRATUS*

Espèce ubiquiste le long des côtes normandes, l'algue brune *Fucus serratus* est un bon bio-indicateur qui présente l'avantage d'avoir une croissance continue et d'être émergé peu de temps ; généralement aux marées de vive eau. Par ailleurs, en tant qu'organisme vivant fixé, *Fucus serratus* rend compte d'événements locaux plus récents que les sédiments.

Le long du littoral normand, les prélèvements ont porté autant que possible sur les algues âgées, d'une longueur minimale de 30 cm et présentes sur les positions les plus avancées de l'estran. Cependant, il n'a pas été possible de prélever au Tréport et à proximité de l'embouchure de la Seine, de Deauville au Havre, où le manque de supports limiterait le développement de l'espèce (communication de J. Cosson).

---

* ** Regroupement proposé par le Groupe de travail n°3 (GT3) du Comité Radiologique Nord-Cotentin ; mise en garde du GT3 : « Ces regroupements sont à considérer avec prudence puisqu'ils reposent avant tout sur l'état actuel des connaissances en matière de chimie. ».*

Résultats

Cinq radioéléments artificiels sont principalement identifiés : ^{129}I (fig. A), ^{60}Co (fig. B) et ^{137}Cs sont observés tout le long du littoral alors que ^{106}Ru (fig. C) et ^{110m}Ag ne sont détectés qu'à proximité d'émissaires de rejets. A noter que ^{131}I est décelé ponctuellement en automne à Fécamp et Port en Bessin (activité ≤ 1 Bq/kg sec).

Figures A, B et C : Activités (Bq/kg sec) en ^{129}I, ^{60}Co et ^{106}Ru dans les algues brunes, Fucus serratus, prélevées le long du littoral normand au printemps et en automne1997.
L'absence de valeur correspond à une activité inférieure à la limite de détection sauf pour les sites entre crochets où elle correspond à un prélèvement non effectué au printemps.

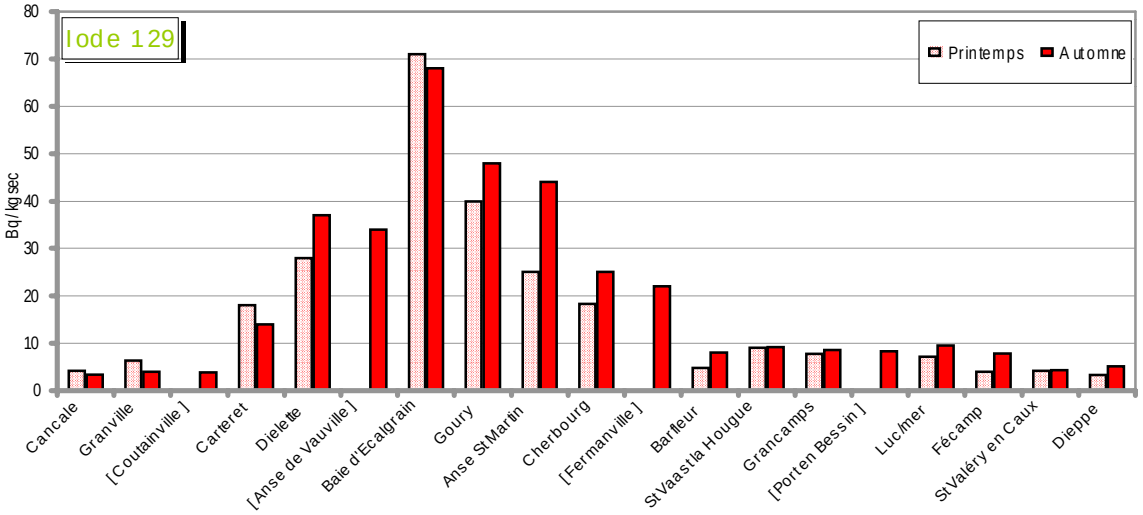


Figure A

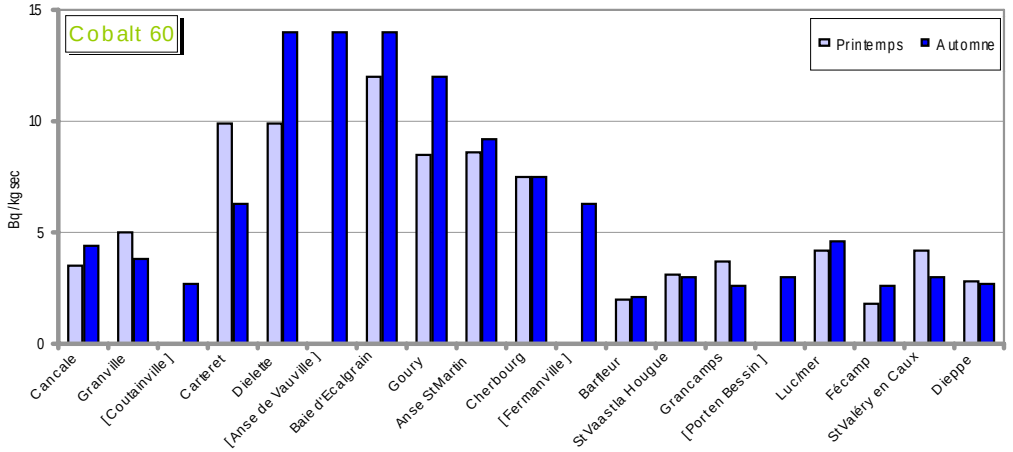


Figure B

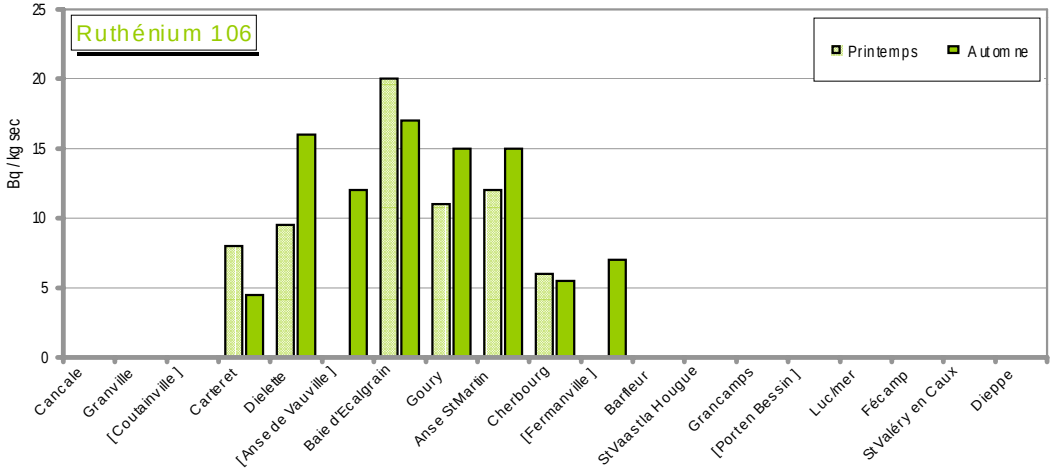
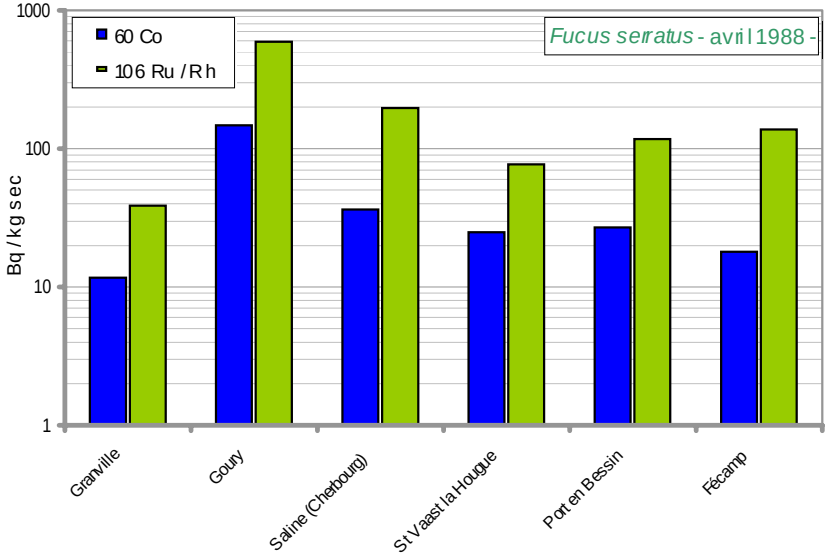


Figure C

En comparaison, il y a 9 ans :



Activités de radionucléides artificiels dosés dans les algues prélevées le long des côtes de la Manche de Roscoff à Cap Gris Nez entre mars 87 et avril 88.

	Activité en Bq/kg sec	
	N-O Cotentin	Autres sites
^{137}Cs	< 4	
^{125}Sb	1 à 18	
^{110m}Ag*	< 20	< 4
^{58}Co*	< 40	< 15
^{54}Mn*	< 5	peu décelé

Source : CSPI (1989)

D'une saison à l'autre, on constate que les activités relevées en un lieu donné sont comparables.

Pour ^{129}I et ^{60}Co, seuls radioéléments détectés à des niveaux significatifs tout le long du littoral, les résultats (fig. D vs fig. E) montrent un même profil dans leur distribution spatiale. Les teneurs sont maximales à proximité de l'émissaire de rejet de l'usine de retraitement de la Hague (pointe Nord-Ouest du Cotentin) puis décroissent, de part et d'autre en fonction de l'éloignement, pour atteindre au Sud de Carteret comme à l'Est de Fermanville des niveaux qui évoluent peu pour le reste du littoral.

Ainsi, les activités sont, à la Baie d'Ecalgrain, de 70 Bq/kg sec pour ^{129}I et d'une dizaine de Bq/kg sec pour ^{60}Co alors qu'au Sud de Carteret comme à l'est de Fermanville, elles sont comprises entre 4 et 10 Bq/kg sec pour ^{129}I et entre 2 et 5 Bq/kg sec pour ^{60}Co.

Cette décroissance des niveaux de radioactivité pour *Fucus serratus* en fonction de l'éloignement à l'émissaire peut être caractérisée par une fonction puissance[8] $y(d) = \alpha d^{-\beta}$ (Germain *et al.*, 1990). On constate[9] alors pour ^{129}I que le coefficient de concentration r^2, retenu pour traduire la qualité de l'ajustement des points, est,

---

[8] *« y(d) » correspond au niveau d'activité du radioélément pour un bio-indicateur ; α et β sont des coefficients d'ajustement déterminés par la méthode des moindres carrés et «d» représente la distance de la station de prélèvement à l'émissaire de rejet*

[9] *Pour ^{60}Co, les faibles teneurs enregistrées limitent le recours à cet outil*

en automne comme au printemps, relativement bon pour les portions de côte Est (de la Baie d'Ecalgrain à Dieppe) et Sud-Ouest (de l'Anse de Vauville à Cancale) (Cf. figure G page suivante).

La diminution des niveaux de ^{129}I tendrait donc, dans l'ensemble, à se faire normalement en fonction de l'éloignement à l'émissaire. Cependant, les résultats d'automne montrent que le gradient de décroissance n'est pas respecté lorsqu'on passe du Nord-Cotentin à la Baie de Seine ; une chute très nette des activités est enregistrée. Ce phénomène pourrait éventuellement s'expliquer par une élévation des niveaux à Fermanville en relation avec sa position de cap ou par une réduction des activités à l'Est de Barfleur due au fait que seule une fraction de ^{129}I progresse vers la Baie de Seine ; une étude complémentaire est indispensable pour apporter plus de précision. A noter que Germain *et al.* (1990) ont déjà observé un phénomène similaire pour ^{106}Ru et ^{60}Co à partir de l'étude des moules de la pointe de Barfleur à Carteret.

Par ailleurs, on note une dissymétrie dans la distribution de ^{129}I de part et d'autre de la pointe de La Hague : à distance égale, les niveaux relevés à l'Est apparaissent légèrement supérieurs à ceux observés au Sud (Baie de Seine versus Golfe Normand-Breton par exemple). Cette observation irait dans le sens d'une dispersion de ^{129}I principalement vers l'Est sous la poussée des eaux atlantiques ; Guéguéniat *et al.* (1988) avaient déjà souligné cette tendance pour des radionucléides rejetés par l'usine de La Hague à partir de l'étude de la répartition de ^{125}Sb en Manche.

Figures D, E et F : Répartition en fonction de la distance (km) à l'émissaire de rejets de l'usine de retraitement de La Hague des activités (en Bq/kg sec) en ^{129}I, ^{60}Co et ^{106}Ru chez l'algue brune, Fucus serratus, prélevée le long du littoral normand au printemps et en automne 1997. L'absence de valeur correspond à une activité inférieure à la limite de détection.

Figure D

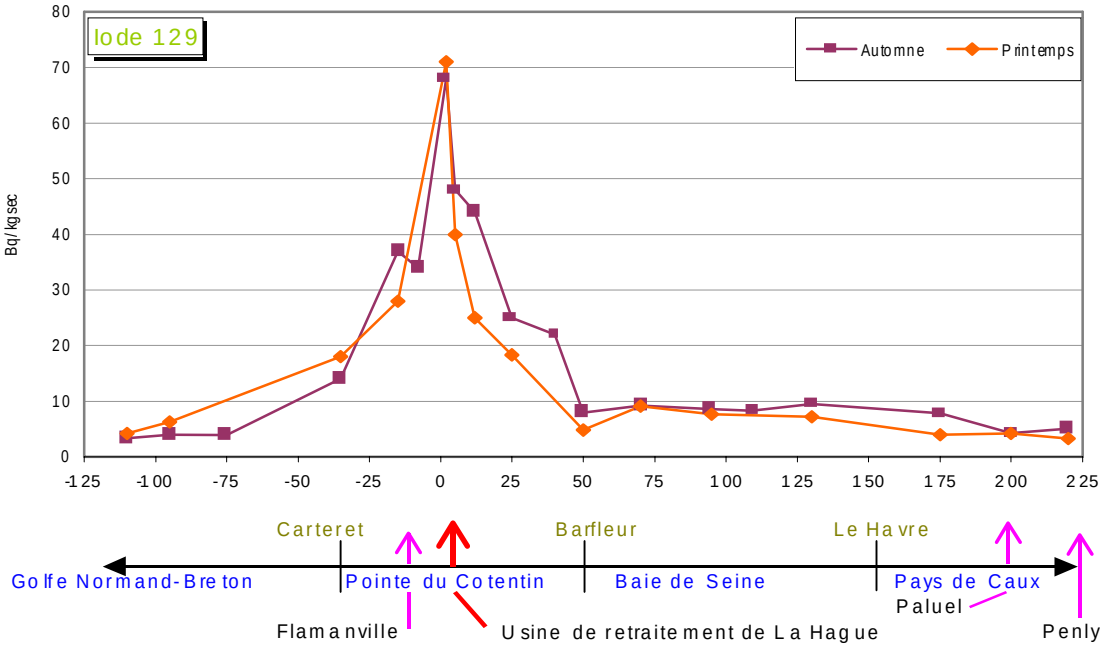


Figure E

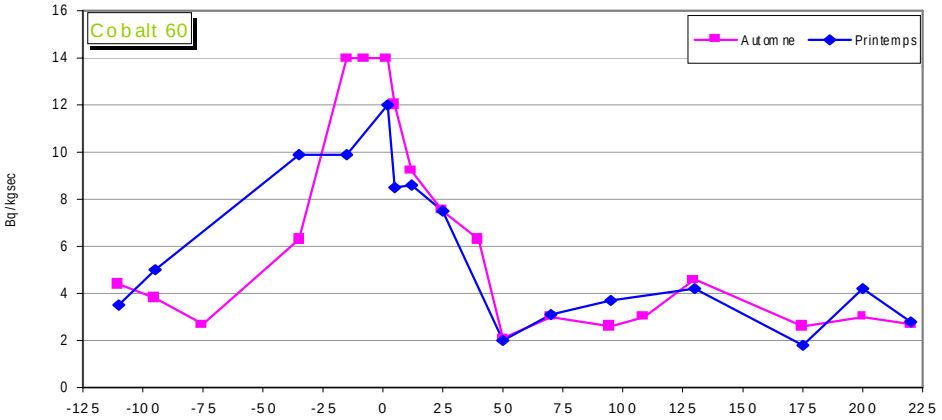
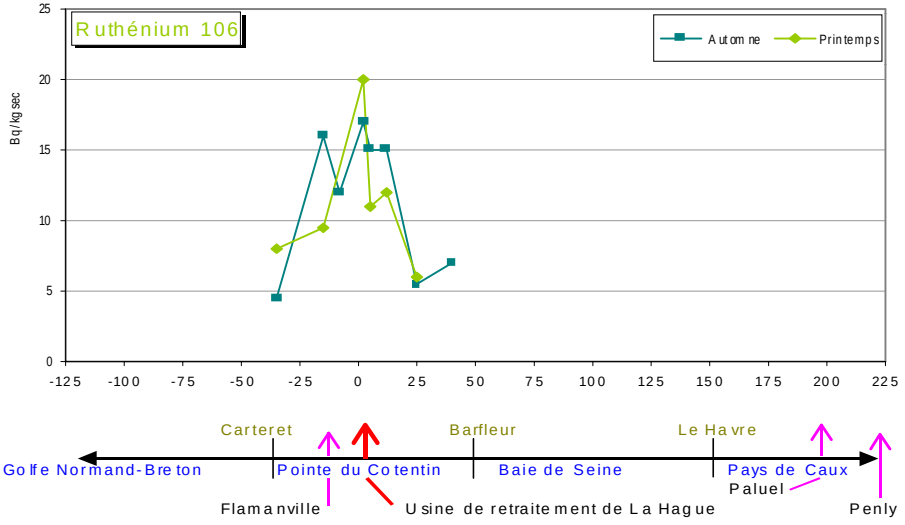


Figure F



Concernant ^{137}Cs, radioélément qui compte parmi les principaux rejetés par l'usine de La Hague (2460 GBq en 1997), il est également détecté tout le long du littoral normand mais à l'état de trace (≤ 1,5 Bq/kg sec). Cette large répartition uniforme associée à de faibles niveaux tient à ses qualités physico-chimiques aux potentialités assez faibles de fixation de la part des espèces biologiques, ainsi qu'au fait que ^{137}Cs provient également des retombées des essais nucléaires atmosphériques dont la répartition spatiale est homogène dans l'hémisphère Nord (expression empruntée à Germain *et al.*, 1990).

Pour ^{106}Ru et ^{110m}Ag, les résultats montrent que ces deux radioéléments ne sont détectables qu'à proximité d'émissaires de rejets. Le premier, caractéristique des rejets de l'usine de La Hague, est détecté uniquement dans le Cotentin (fig. C), entre Carteret et Fermanville ; les activités varient entre 5 et 20 Bq/kg sec. Au delà, aucune activité significative n'est relevée. Le second, ^{110m}Ag, est caractéristique des rejets des centrales électronucléaires. Il est décelé à l'état de trace (≤ 1,2 Bq/kg sec) à Dielette et à Saint Valéry en Caux ; stations respectivement proches des centrales de Flamanville et de Paluel.

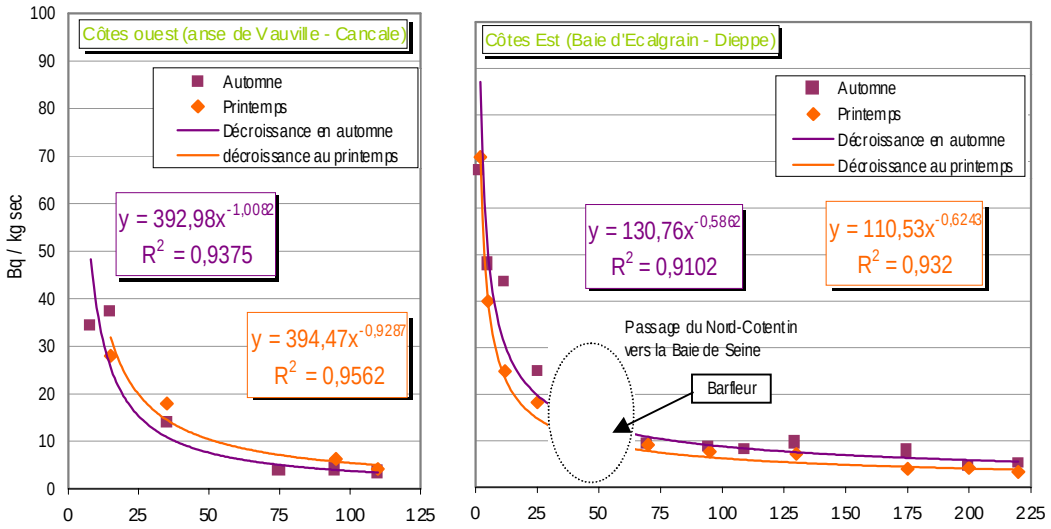


Figure G :Décroissance des niveaux de ^{129}I, en fonction de la distance (km) à l'émissaire de rejet de l'usine de La Hague, dans l'algue brune, Fucus serratus, le long des côtes normandes : figure de gauche, côte Ouest (Anse de Vauville - Cancale) ; figure de droite, côte Est (Baie d'Ecalgrain - Dieppe).

SEDIMENTS ET SABLES

Composante à part entière du milieu marin, la masse sédimentaire est le siège de divers processus de rétention des éléments présents à l'état de trace dans l'eau.

De nombreux facteurs conditionnent les processus et le taux de fixation des radioéléments artificiels sur les sédiments : facteurs propres aux sédiments eux-mêmes, à la nature des radioéléments et enfin au milieu. (Ancellin *et al.*, 1979)

Néanmoins, les radioéléments se fixent d'autant mieux sur les sédiments que ceux-ci sont fins, et l'abondance en particules fines (≤ 63 µm) devient un facteur essentiel de modulation des concentrations mesurées. (Boust, 1998)

Aussi, le long du littoral, les prélèvements ont essentiellement concerné les sédiments immergés dans les ports, en raison de leur finesse. Seule la couche superficielle, généralement ≤ 0,5 cm, a été prise en compte ; le comportement des particules y est très proche de celui des matières en suspension dans l'eau de mer (communication de J.P. Auffret). Cependant, dans le Nord-Cotentin, de Dielette à l'Anse Saint Martin, l'absence de havres ou de baies, propices à la sédimentation des particules fines, nous a contraint à collecter du sable sur les plages.

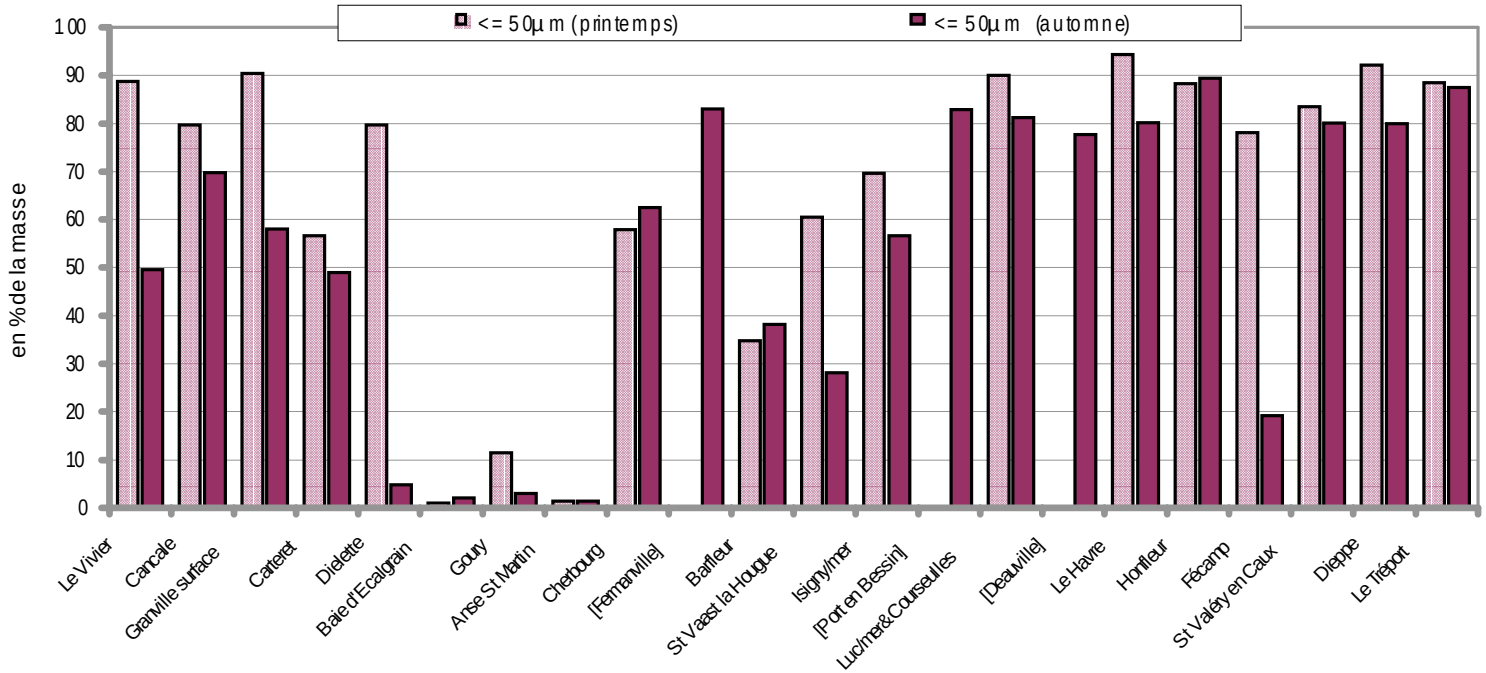


Figure H : Granulométrie des sédiments et sables de plage prélevés le long du littoral normand au printemps et en automne 1997. La classe granulométrique présentée «x ≤ 50 µm» correspond au cumul des argiles et limons (fins et grossiers) exprimé en % de la masse

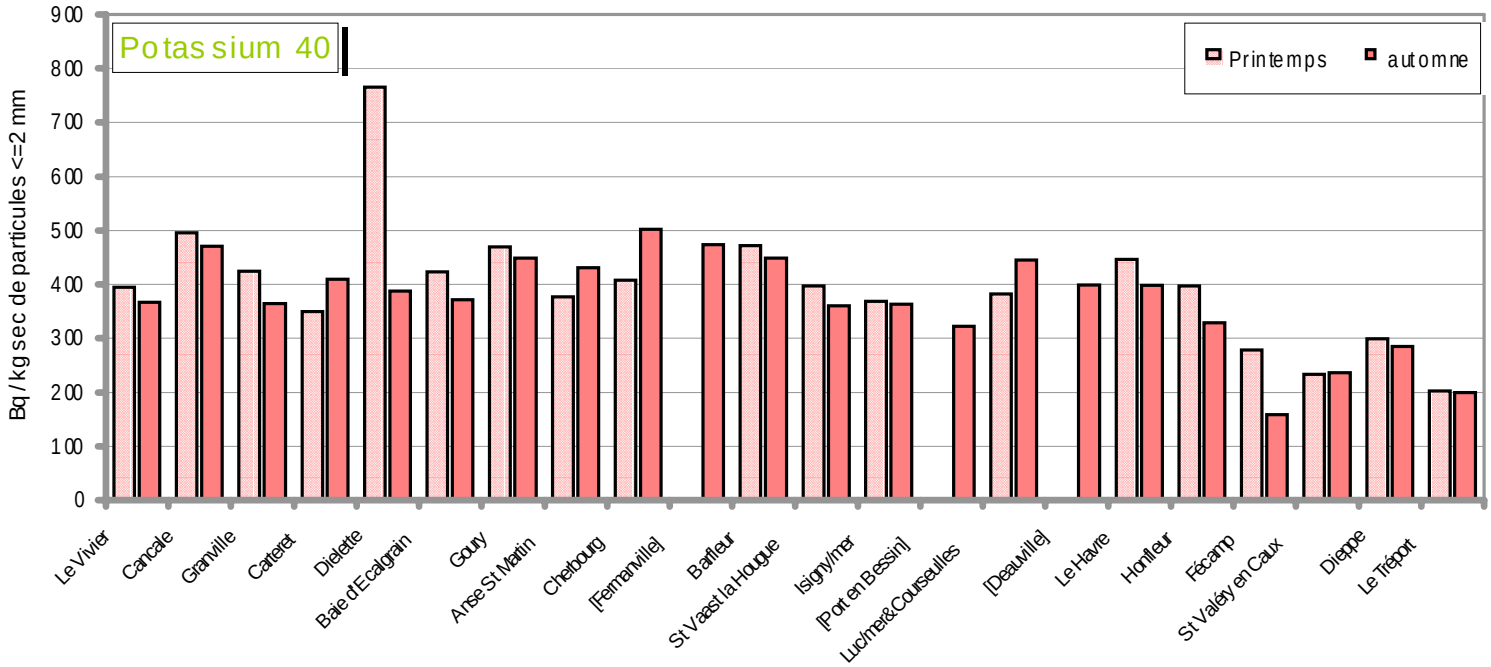


Figure I :Activités (Bq/kg sec) en ^{40}K des sédiments et sables de plage prélevés le long du littoral normand au printemps et en automne 1997.

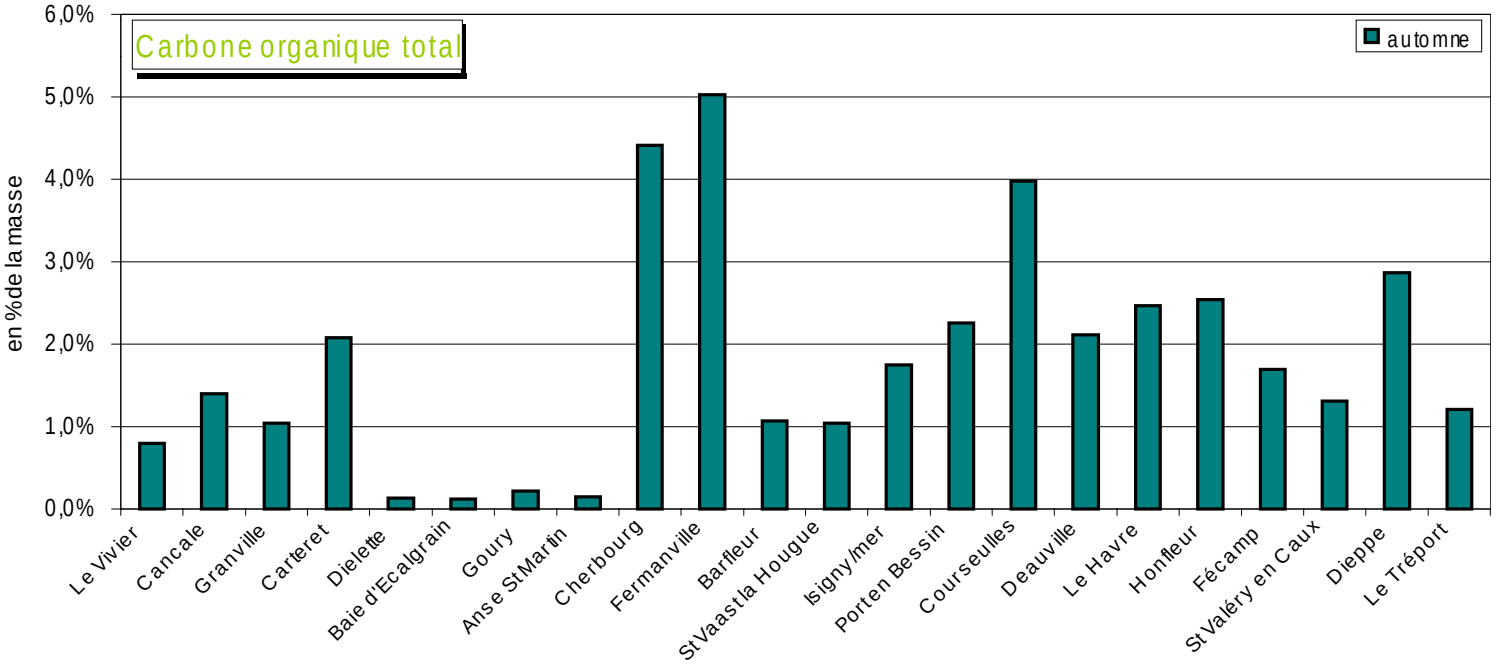


Figure J : Teneur (% de la masse) en carbone organique total (C.O.T.) des sédiments et sables de plage prélevés le long du littoral normand en automne 1997.

La distinction entre sable de plage et sédiments transparait, très nettement, sur les figures H et J. En règle générale, la teneur en particules fines (≤ 50 µm) varie de 1,4 à 4,8 % pour les sables contre 50 à 90 % pour les sédiments. De même, la teneur en carbone organique total (COT)[10] est de l'ordre de 0,1 à 0,2 % pour les sables alors que pour les sédiments elle est comprise entre 1 et 5 %.

Par ailleurs, les mesures en potassium 40, radioélément naturel (^{40}K), rapportées sur la figure I, montrent que les sédiments prélevés le long du littoral n'ont pas forcément la même composition minéralogique. Deux stocks peuvent être distingués. Le premier s'étend du Golfe Normand-Breton à la Baie de Seine et l'activité moyenne en ^{40}K (de 420 ± 78 Bq/kg sec), traduit les affleurement granitiques de la côte. Le second stock concerne le Pays de Caux et l'activité moyenne en ^{40}K (de 237 ± 48 Bq/kg sec), traduit le passage à une argile à silex, plus riche en kaolin et moins en illite.

Résultats

Cinq radioéléments artificiels sont identifiés : ^{60}Co, ^{137}Cs et ^{241}Am sont détectés quasiment tout le long du littoral comme en témoignent les figures K, L et M alors que ^{54}Mn et ^{106}Ru ne sont que ponctuellement décelés.

[10] Les mesures n'ont été effectuées que sur les échantillons prélevés en automne 1997.

Expression des résultats

Deux expressions sont utilisées :

La première, en Bq/kg sec, correspond à la teneur réelle des radionucléides dans la masse sédimentaire. Cette expression présente un attrait radiologique, et dans cette optique, une distinction peut être faite entre sédiments et sables de plage puisque seuls ces derniers sont fréquentés au titre d'activités récréatives.

La seconde expression, en Bq/kg sec ≤ 50 µm, correspond à la normalisation des activités à la granulométrie, c'est-à-dire à la teneur en particules « fines » contenues dans chacun des échantillons. Cette expression permet de comparer entre elles les activités en des lieux différents, éventuellement en des instants différents, et d'apprécier la manière dont se répartissent les radioéléments le long du littoral.

D'une saison à l'autre, on constate que les activités brutes (en Bq/kg sec) évoluent peu dans l'ensemble malgré quelques différences parfois notables comme à Fécamp, Saint Vaast la Hougue, Goury ou encore Dielette. Ces différences sont à placer en regard de la granulométrie des prélèvements et plus particulièrement de l'abondance de la fraction fine (figure H) qui peut, à elle seule, induire des variations de concentration d'au moins un ordre de grandeur (Boust, 1998). Ceci explique également que, le long du littoral, les niveaux relevés ne sont pas les mêmes selon que les prélèvements ont concerné du sable de plage ou des sédiments fins immergés dans les ports.

Figures K, L et M : Activités (Bq/kg sec) en ^{60}Co, ^{137}Cs et ^{241}Am des sédiments et sables de plage prélevés le long du littoral normand au printemps et en automne 1997.
L'absence de valeur correspond à une activité inférieure à la limite de détection sauf pour les sites entre crochets où elle correspond à un prélèvement non effectué au printemps.

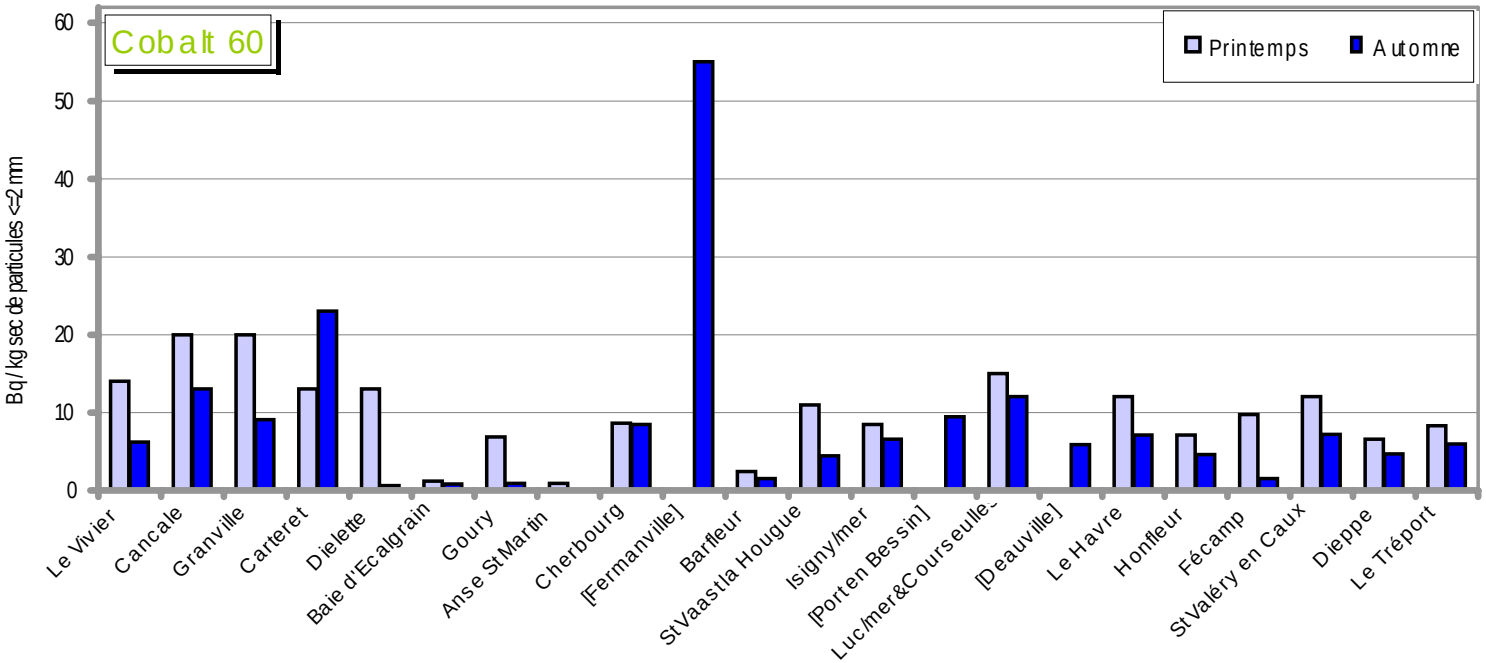


Figure K

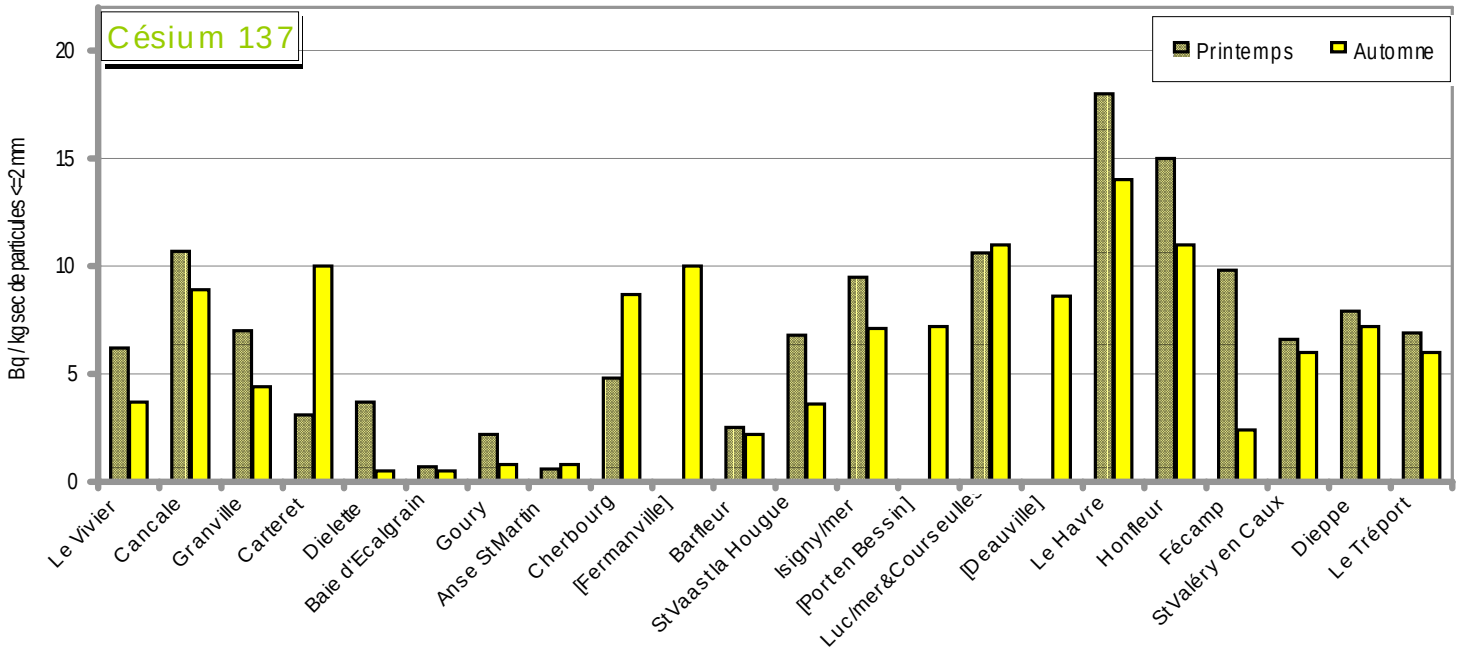

Césium 137
Printemps
Automne
Bq / kg sec de particules <=2 mm
0
5
10
15
20
Le Vivier
Cancale
Granville
Carteret
Dielette
Baie d'Ecalgrain
Goury
Anse St Martin
Cherbourg
[Fermanville]
Barfleur
St Vaast la Hougue
Isigny/mer
[Porten Bessin]
Luc/mer&Courseulle-
[Deauville]
Le Havre
Honfleur
Fécamp
St Valéry en Caux
Dieppe
Le Tréport

Figure L

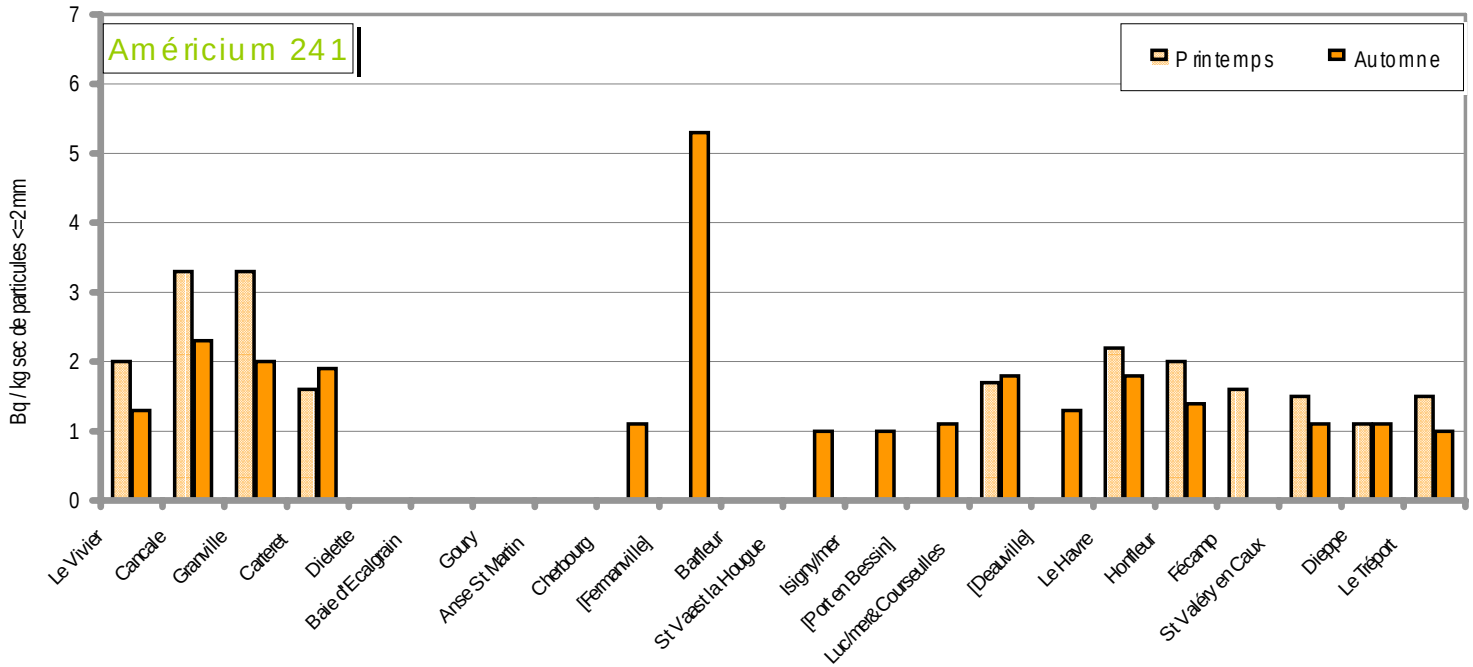

Américium 241
Printemps
Automne
Bq / kg sec de particules <=2mm
0
1
2
3
4
5
6
7
Le Vivier
Cancale
Granville
Carteret
Diélette
Baie d'Ecalgrain
Gouy
Anse St Martin
Cherbourg
[Fermanville]
Barfleur
St Vaast la Hougue
Isigny/mer
[Port en Bessin]
Luc/mer&Courseulles
[Deauville]
Le Havre
Honfleur
Fécamp
St Valéry en Caux
Dieppe
Le Tréport

Figure M

En comparaison, il y a 5 ans

Activités mini et maxi (et fréquences de détection) de radionucléides artificiels dosés dans les sédiments marins lors du suivi radioécologique 1992 de l'environnement des centrales nucléaires françaises le long de la Manche.

	Activité en Bq / kg sec			
	Flamanville (avril 1992)	Paluel (Juin 1992)	Penly (mai 1992)	Graveline (juin 1992)
^{137}Cs	0,3 - 1,5 (3/3)	0,7 - 16 (3/3)	2,3 - 9,0 (3/3)	2,8 - 9,8 (2/3)
^{60}Co	0,9 - 1,5 (3/3)	1,8 - 20 (3/3)	2,0 - 11 (3/3)	3,5 - 12 (2/3)
^{106}Ru	-	14 - 18 (2/3)	7,0 - 11 (2/3)	5,0 - 11 (2/3)
^{54}Mn	-	-	-	?
^{110m}Ag	?	1,4 - 1,6 (2/3)	-	0,3 - 1,7 (3/3)
^{241}Am	0,6 (1/3)	3,7 (1/3)	1,3 - 2,0 (2/3)	2,6 (1/3)

Source : Vray et al., 1997

En effet, les sables de plage présentent généralement les plus faibles niveaux. Pour ^{137}Cs et ^{60}Co, les activités sont inférieures ou de l'ordre de 1 Bq/kg sec et pour ^{241}Am, aucune activité significative n'est relevée. En revanche, pour les sédiments, les niveaux en ^{137}Cs et ^{60}Co sont plus élevés (de 3 à 20 Bq/kg sec). ^{241}Am est détecté et son activité varie entre 1 et 3 Bq/kg sec.

On remarque également que tous les résultats obtenus sur les sédiments fins font comparativement ressortir, sauf pour ^{137}Cs, une contamination plus élevée à Fermanville qu'ailleurs ; observation qui va dans le sens de celle déjà faite par Guéguéniat *et al.* (1976) au cours de l'étude de la radioactivité artificielle dans les sédiments de la Manche pendant les années 1971-1975. Ainsi, on relève la présence de ^{54}Mn, de ^{106}Ru et d'une activité en ^{60}Co et ^{241}Am plus importante à Fermanville. Ce phénomène, perceptible dans les sédiments, est sans doute à relier aux courants particuliers de la région (voir carte page 4) qui renforceraient l'exposition des Caps aux eaux marquées par les rejets de l'usine de retraitement de La Hague.

Répartition spatiale

Après normalisation des activités à la teneur en particules fines (≤ 50 µm), il est possible d'apprécier la manière dont se répartissent les principaux radioéléments le long du littoral.

Figures N, O et P : Répartition en fonction de la distance (en km) à l'émissaire de rejets de l'usine de retraitement de combustibles irradiés de La Hague du ^{137}Cs, ^{60}Co et ^{241}Am dans les sédiments et sables de plage prélevés le long du littoral normand au printemps et en automne 1997.

Les activités sont rapportées à la fraction inférieure ou égale à 50µm (Bq/kg sec ≤50µm). L'absence de valeur correspond à une activité inférieure à la limite de détection.

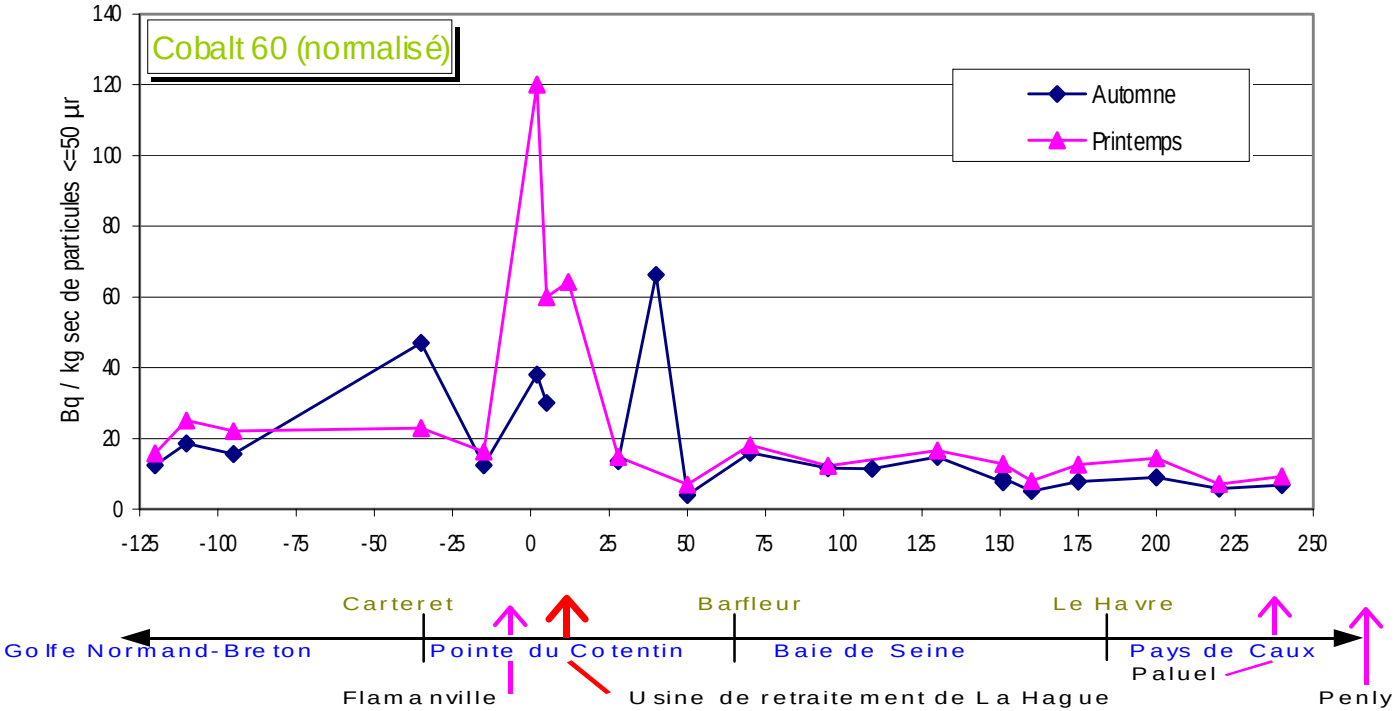


Figure N

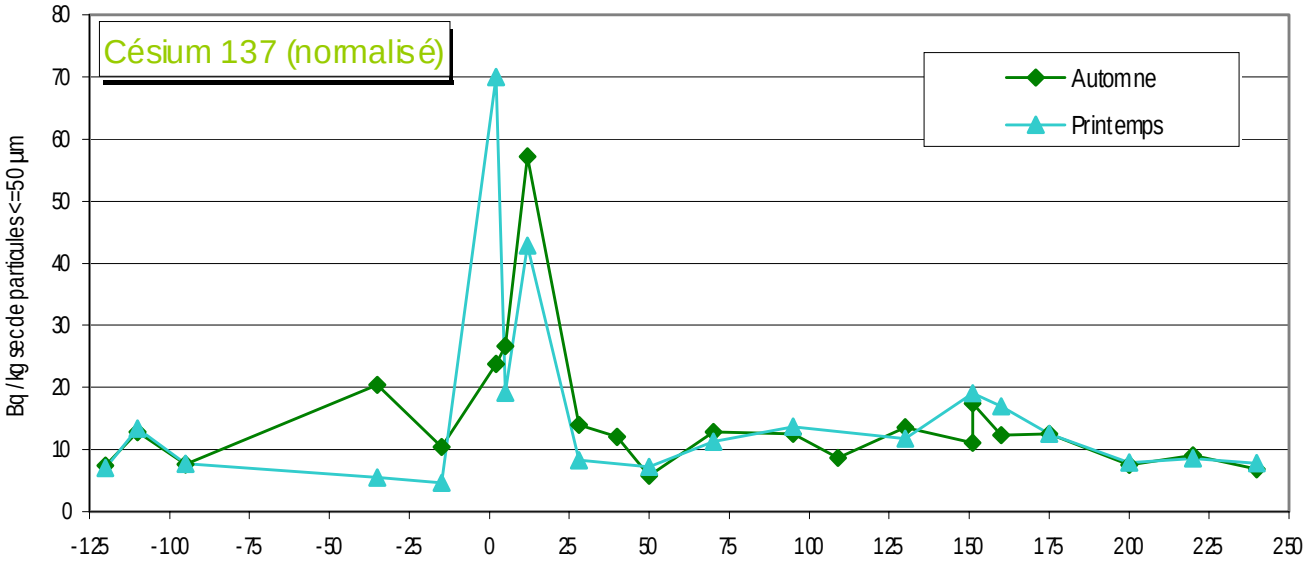

Césium 137 (nomalisé)
Automne
Printemps
Bq / kg sec de particules <=50 µm
80
70
60
50
40
30
20
10
0
-125
-100
-75
-50
-25
0
25
50
75
100
125
150
175
200
225
250

Figure O

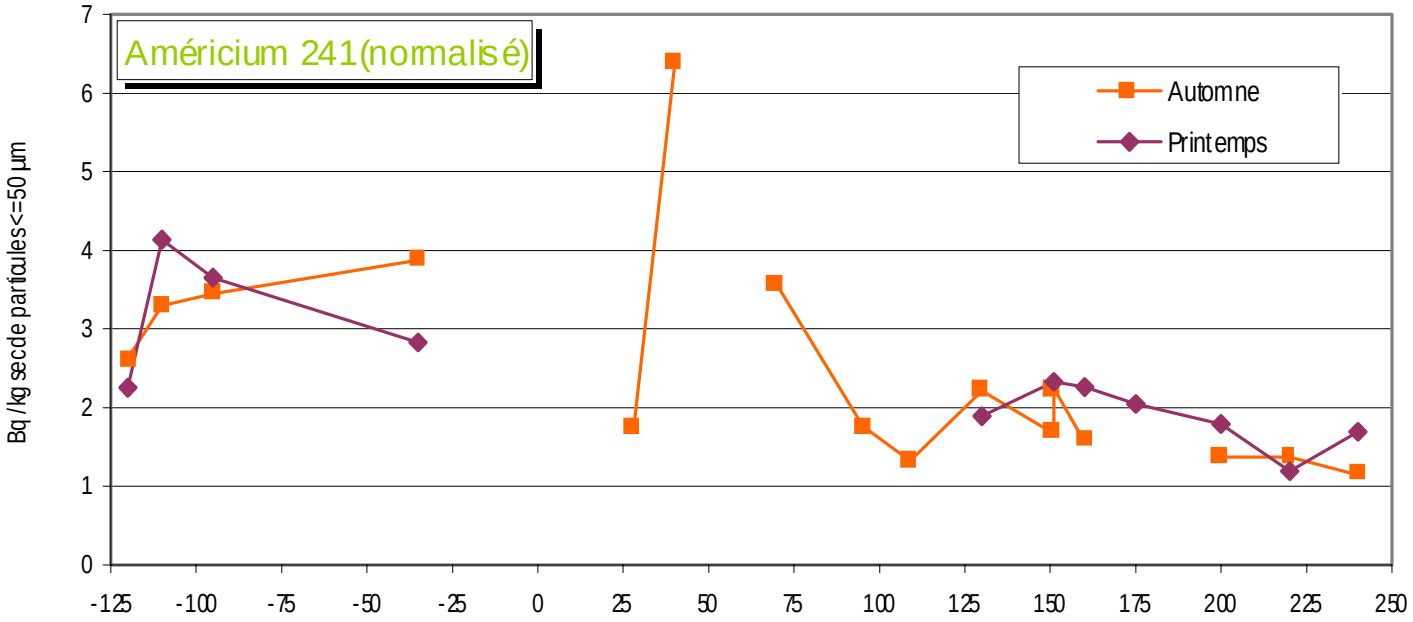

Américium 241(normalisé)
Automne
Printemps
Bq/kg secde particules<=50 µm
7
6
5
4
3
2
1
0
-125
-100
-75
-50
-25
0
25
50
75
100
125
150
175
200
225
250

Figure P

Pour ^{137}Cs (fig. O), on constate que le marquage de la masse sédimentaire est, à l'exception de la pointe Nord-Ouest du Cotentin, à peu près uniforme le long des côtes : 10,8 ± 3,9 Bq/kg sec ≤ 50 µm.

A proximité de l'embouchure de la Seine, l'élévation (plus faible) du niveau normalisé témoigne des apports telluriques de ce fleuve. En effet, la Seine, dont le bassin versant couvre 75 000 km^2, draine du ^{137}Cs principalement issu des retombées antérieures et postérieures à l'accident de Tchernobyl. Elle constitue de ce fait, un vecteur de contamination des eaux côtières, principalement des eaux côtières du Pays de Caux et de la région Pas de Calais, comme Guéguéniat *et al.* (1988) ont pu le souligner à partir de l'étude du ^{134}Cs consécutive à l'accident de Tchernobyl.

Pour le ^{60}Co (fig. N), on remarque que le marquage de la masse sédimentaire évolue peu le long du littoral sauf entre Carteret et Fermanville. A partir de Barfleur et en progressant vers l'Est, la diminution des niveaux, comme on pourrait s'y attendre, n'est que très peu prononcée : l'activité normalisée moyenne est de 10,3 ± 4,0 Bq/kg sec ≤ 50 µm. Par ailleurs, à une même distance de l'émissaire de rejet de l'usine de La Hague, le Golfe Normand-Breton apparaît légèrement plus marqué que la Baie de Seine. Il en est de même pour ^{241}Am (fig. P), radioélément qui présente comme ^{60}Co une tendance marquée à se fixer sur les enduits minéraux (communication de R. Gandont) ; ceci n'est pas le cas du ^{137}Cs.

Concernant l'élévation des niveaux normalisés en ^{60}Co et ^{137}Cs dans les sables de la pointe du Nord-Ouest Cotentin, elle sous-tendrait un renforcement de l'exposition à des eaux plus marquées par les rejets de l'usine de retraitement de La Hague. Cependant, l'absence de prélèvements de sable à plus grande distance limite l'appréciation du phénomène.

Distribution verticale

Après transfert des radioéléments de l'eau à la phase particulaire, leur devenir va dépendre de deux phénomènes opposés (Ancellin *et al.*, 1979) : l'un qui tend à les faire repasser dans la colonne d'eau ; l'autre qui tend à les faire pénétrer dans les couches plus profondes. Concernant ce dernier aspect, les prélèvements (découpés en 3 horizons) effectués dans le port de Granville (Fig. Q) renseignent sur la répartition des radioéléments au sein de la masse sédimentaire.

Les résultats soulignent que les trois principaux radioéléments détectés dans les sédiments superficiels le long du littoral sont également présents dans les couches plus profondes. En terme d'activité, le marquage des masses sédimentaires est homogène pour ^{137}Cs et ^{241}Am quelque soit la profondeur et malgré le passage d'un milieu oxydé (couche superficielle) à un milieu réducteur (couche plus profonde). Pour ^{60}Co, des différences notables apparaissent pour le carottage effectué en automne et sont difficilement explicables à partir des seuls résultats disponibles.

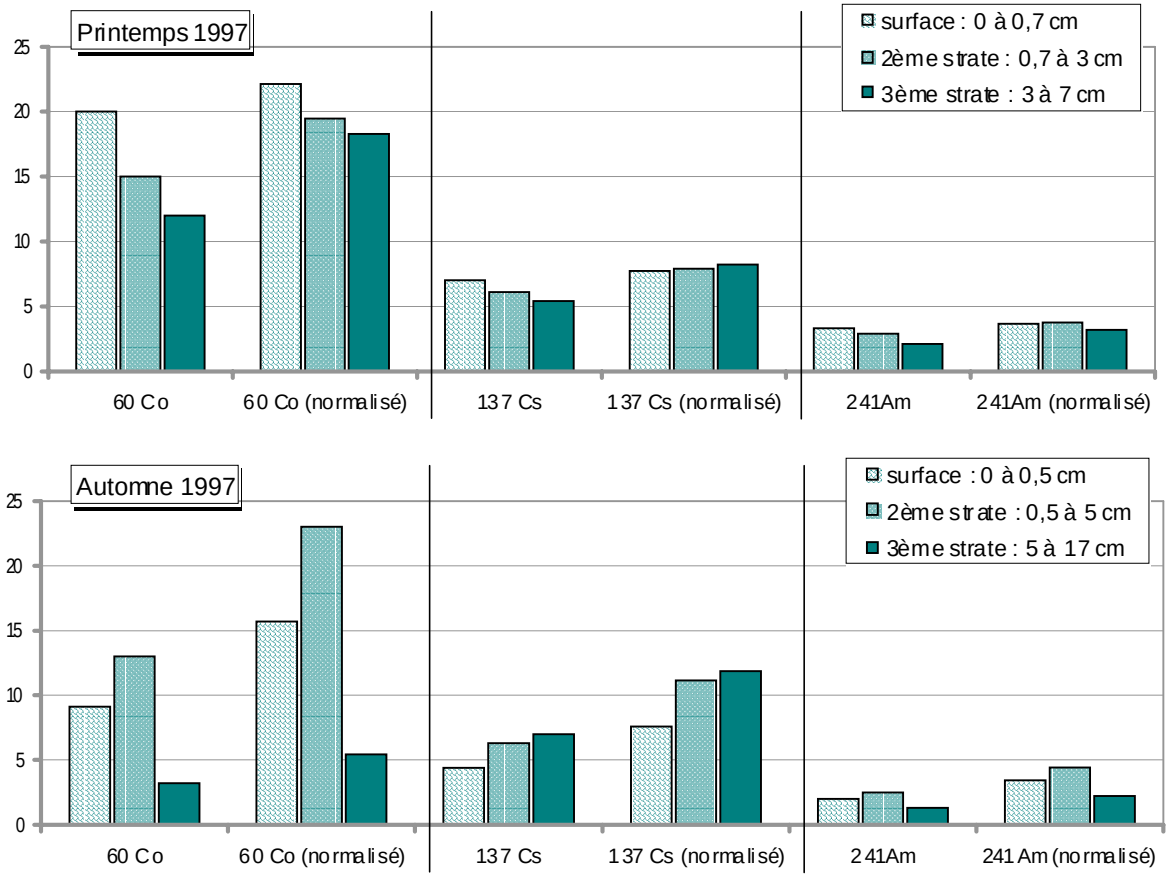


Figure Q : Activités ^{60}Co, ^{137}Cs et ^{241}Am mesurées dans les différentes strates de deux carotages de sédiments marins effectués dans le port de Granville.
Les activités sont, par défauts, à comprendre en Bq / kg sec <= 2 mm, sauf dans le cas de la normalisation : Bq / kg sec <= 50 µm.

LA FAUNE MARINE : MOULES, PATELLES…

De même que les sédiments ou la flore, la faune marine est susceptible de fixer des éléments à l'état de trace selon des modalités et des taux tributaires des propriétés du radioélément, du milieu et du support lui-même (Ancellin *et al.*, 1979). Aussi, la mesure d'animaux marins est d'autant plus importante qu'ils entrent dans la chaîne alimentaire de l'homme.

Dans le cadre de cette étude, deux espèces ont été privilégiées[11] : les moules sauvages *(Mytilus edulis)* et les patelles *(Patella vulgata).* Cependant, il n'a pas été possible de collecter ces animaux marins tout le long du littoral normand, notamment de Dielette à Barfleur pour les moules et de Luc sur Mer à Honfleur pour les patelles.

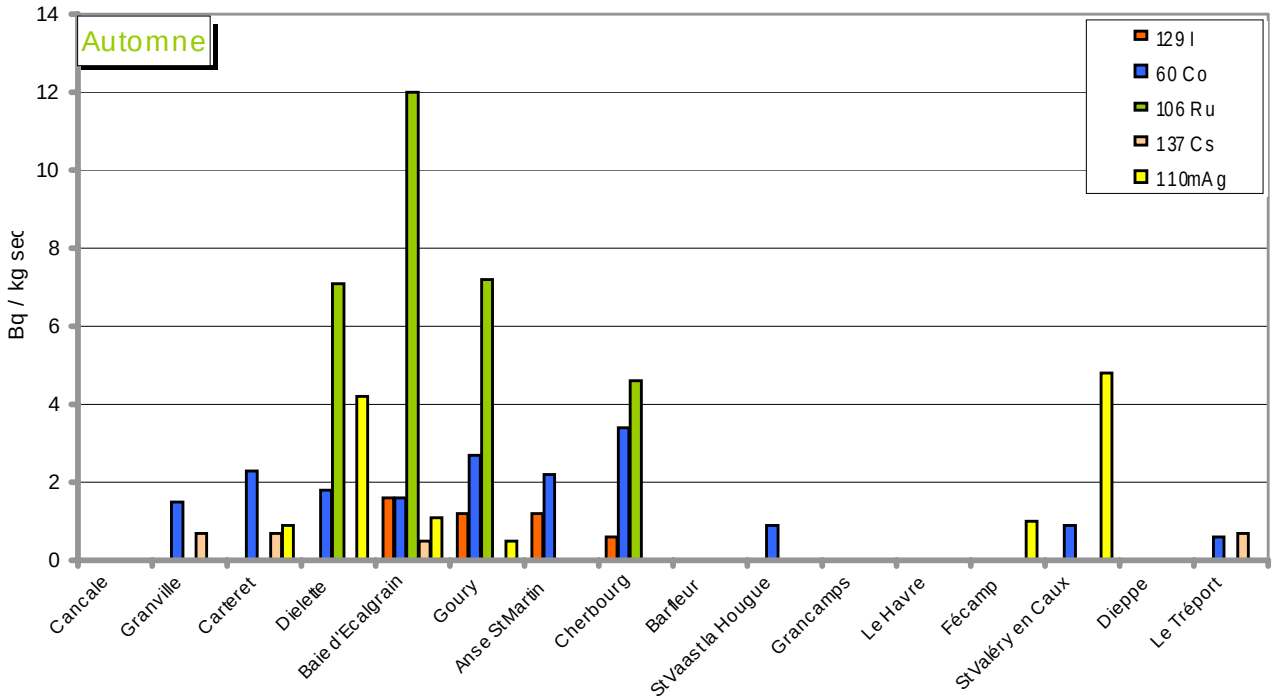
Résultats

Les patelles

A la différence des espèces suivantes, les patelles ont fait l'objet en automne d'une analyse plus poussée ; les limites de détection ont été réduites d'un facteur 4 en analysant de plus grandes quantités de chair. Le but était de quantifier la

[11] D'autres espèces, rassemblées sous l'intitulé « bio-indicateurs complémentaires » ont également fait l'objet de prélèvements (huîtres, crépidules, anémones de mer et étoiles de mer) mais le nombre reste faible 6 (voir carte 1)

fraction de radioactivité artificielle, aussi faible soit elle, intégrée par ce bio-indicateur afin d'en apprécier la répartition le long du littoral normand.

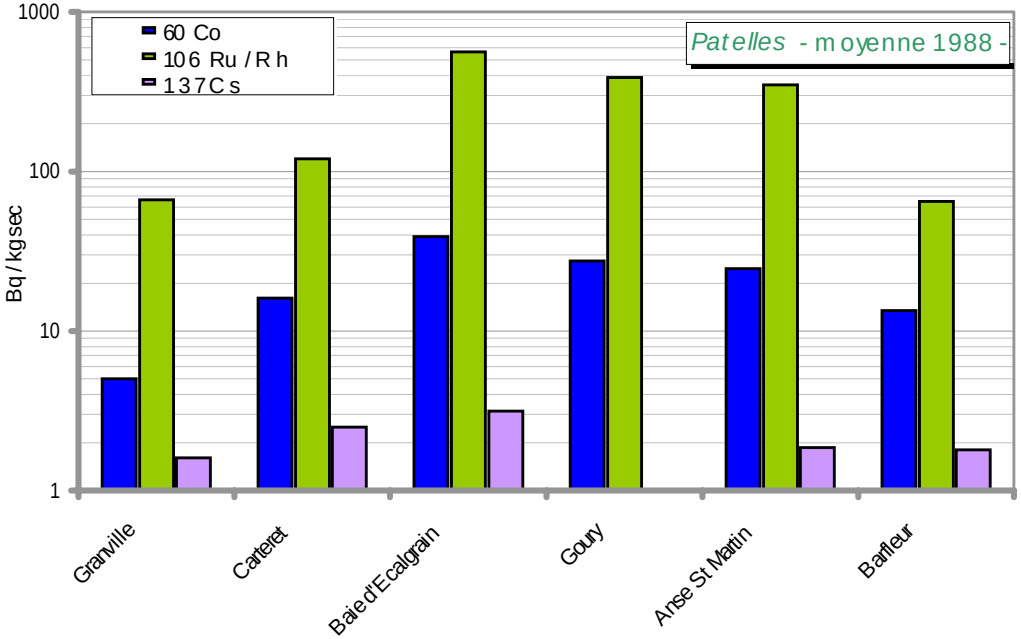


Activités (Bq/kg sec) en ^{129}I, ^{60}Co, ^{106}Ru, ^{137}Cs et ^{110m}Ag dans les patelles prélevées le long du littoral normand en automne 1997.
L'absence de valeur correspond à une activité inférieure à la limite de détection.

Au printemps, seuls deux radioéléments artificiels sont ponctuellement identifiés. Il s'agit de ^{110m}Ag à Dielette (2,2 Bq/kg sec) et Saint Valery en Caux (5,5 Bq/kg sec), et du ^{60}Co à la Baie d'Ecalgrain (4 Bq/kg sec) et Goury (4,2 Bq/kg sec).

L'abaissement des limites de détection, appliqué aux prélèvements d'automne, permet d'identifier cinq radioéléments (fig. R), principalement dans le Cotentin. ^{106}Ru et ^{129}I sont observés de Dielette à Cherbourg avec pour activité maximale, respectivement 12 et 1,6 Bq/kg sec à la Baie d'Ecalgrain. Concernant ^{110m}Ag, les activités sont maximales à Dielette et Saint Valéry en Caux avec 5 Bq/kg sec. Cependant, les résultats obtenus soulignent que les rejets de la centrale de Flamanville sont perceptibles entre Carteret et Goury et que ceux de la centrale de Paluel sont susceptibles de marquer les côtes à l'opposé du déplacement des masses d'eau : les patelles de Fécamp, situées à l'Ouest de Paluel, sont faiblement marquées (1 Bq/kg sec). Pour ^{60}Co, seul radioélément à être le plus souvent décelé (10 stations sur 16), les niveaux varient entre 0,6 et 3,4 Bq/kg sec. Il est présent de Granville à Cherbourg ; plus à l'Est, il n'est que peu détecté. A l'inverse, ^{137}Cs est rarement détecté (4 stations) et les valeurs sont proches de la limite de détection (0,6 Bq/kg sec).

En comparaison, il y a 9 ans :



Les résultats sont issus des mesures effectuées par SPR - COGEMA La Hague. Initialement communiqué en Bq/kg frais, ils ont été exprimés en Bq/kg sec en considérant un rapport moyen poids frais sur poids sec égal à 5. D'autres radionucléides ont pu être détectés mais nous n'avons pas d'information à leur sujet.
Source : CSPI (1989)

Les moules et les bio-indicateurs complémentaires

Seules les moules sauvages prélevées en automne à Carteret présentent un marquage significatif, uniquement en ^{60}Co : 2,2 Bq/kg sec.

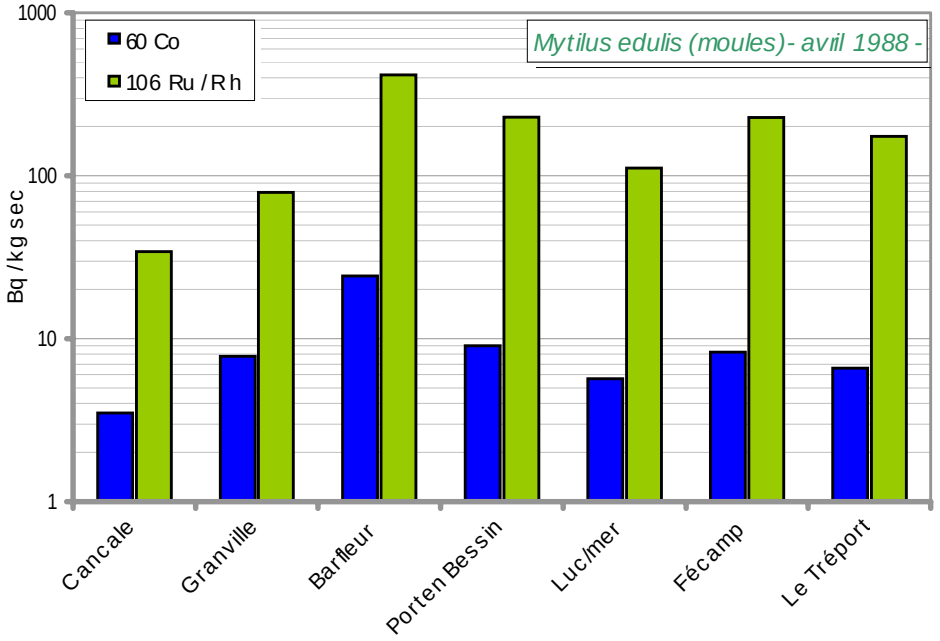
Pour le reste des organismes marins étudiés (moules et bio-indicateurs complémentaires), les analyses faites ne traduisent pas, en regard des limites de détection, la présence de radioéléments artificiels émetteurs gamma. Les limites de détection peuvent se résumer à 15-25 Bq/kg sec pour ^{106}Ru et à 2-3 Bq/kg sec pour les autres principaux radioéléments recherchés.

En comparaison, il y a 9 ans :

	Activité en Bq/kg sec Le long des côtes de la Manche*
^{137}Cs	1 à 3 sauf à Barfleur (3 à 7)
^{125}Sb	1 à 5 à l'Est du Cotentin
^{110m}Ag	< 5 sauf à Gravelines (100)
^{58}Co	1 à 2 sauf Gravelines (10 à 80)
^{54}Mn	< 3

* Sauf pour ^{110m}Ag, ^{58}Co et ^{54}Mn qui ne sont détectés que dans le Cotentin, le Pays de Caux et dans la région de Calais Dunkerque

Activités de divers radionucléides artificiels dosés dans les moules prélevées le long des côtes de la Manche de Roscoff à Gravelines entre mars 87 et avril 88.



Source : Germain et al. (1990)

BILAN POUR LE MILIEU MARIN

En milieu marin, des mesures de radioactivité gamma d'origine artificielle ont été faites sur des échantillons collectés au cours de pêche à pied le long du littoral normand, de Cancale au Tréport. Les compartiments étudiés, au printemps 97 (du 04/04/97 au 26/05/97) et en automne 97 (du 12/11/97 au 12/12/97), étaient, pour l'essentiel, les sédiments fins immergés dans les ports ou les sables de plages, les algues brunes de l'espèce *Fucus serratus*, les patelles et les moules sauvages.

Pour plus d'information sur l'origine des radioéléments détectés, voir page 13 et 14.

Résultats

En 1997, six radioéléments artificiels émetteurs gamma sont essentiellement identifiés. ^{60}Co et ^{137}Cs sont les plus fréquents, ils sont respectivement présents dans 64% et 51% des échantillons analysés ; ces radioéléments sont détectés aussi bien dans les sédiments et les sables que dans la flore ou la faune. ^{241}Am, observé dans 20% des échantillons, est uniquement détecté dans les sédiments fins immergés (27/34) avec lesquels il présente de fortes affinités. Quant à ^{106}Ru, ^{110m}Ag et ^{129}I dont la recherche n'a été effectuée que sur le biologique (66 échantillons contre 136 pour les autres éléments), ils sont respectivement observés dans 16%, 9% et 58% des échantillons analysés. Ces radioéléments sont présents chez l'algue brune (principalement ^{106}Ru et ^{129}I) et chez la patelle (principalement ^{110m}Ag).

De plus, on relève également la présence à l'état de trace de ^{54}Mn et ^{131}I de manière occasionnelle.

Les concentrations les plus élevées sont observées (a) dans les sédiments fins immergés pour ^{60}Co (55 Bq/kg sec), ^{106}Ru (30 Bq/kg sec), ^{137}Cs (18 Bq/kg sec) et ^{241}Am (5,3 Bq/kg sec), (b) dans les algues brunes pour ^{129}I (71 Bq/kg sec) et (c) dans les patelles pour ^{110m}Ag (5,2 Bq/kg sec). Par ailleurs, quelques constats apparus au terme de ce travail peuvent être mis en relief lorsque l'on étudie, pour un radioélément donné, les différents compartiments du milieu marin. (1) Les niveaux d'activité en ^{60}Co mesurés dans les sédiments et chez les algues brunes, *Fucus serratus,* sont dans l'ensemble, du même ordre ; (2) à l'opposé, si ^{137}Cs est bien fixé par les sédiments, il est cependant très peu transféré dans matériel biologique ; (3) les teneurs en ^{106}Ru mesurées dans les algues et dans les patelles sont comparables ; (4) à l'inverse, les concentrations en ^{129}I sont nettement plus importantes (plus d'un ordre de grandeur) dans les algues brunes, *Fucus serratus,* que dans les patelles.

Concernant la distribution spatiale des radioéléments, les résultats en ^{129}I et ^{60}Co obtenus chez *Fucus serratus* montrent que ces deux éléments sont détectables tout le long du littoral et que les teneurs décroissent en fonction de l'éloignement à la pointe Nord-Ouest du Cotentin. Dans le cas de ^{129}I, la distribution des niveaux apparaît asymétrique de part et d'autre de l'émissaire de rejet de l'usine de retraitement de La Hague ; l'essentiel de cet élément se disperserait vers l'est sous la poussée des eaux atlantiques.

Pour ^{106}Ru et ^{110m}Ag, les mesures faites dans le matériel biologique soulignent que ces deux éléments ne sont détectables qu'à proximité d'émissaires : ^{106}Ru se répartit de part et d'autre de l'émissaire de rejet de l'usine de retraitement de La Hague, entre Carteret et Fermanville ; ^{110m}Ag est observé à proximité des émissaires de rejets du CNPE de Flamanville, entre Carteret et Goury, et du CNPE de Paluel, depuis Fécamp jusqu'à Saint Valéry en Caux.

Concernant ^{137}Cs, il est détecté tout le long du littoral où il présente, dans l'ensemble, une répartition uniforme, y compris dans les sédiments après normalisation des activités. Quant à ^{241}Am, observé le long du littoral, les teneurs évoluent peu dans les sédiments sauf dans le Nord-Ouest Cotentin ; constat similaire pour ^{60}Co dans les sédiments.

Globalement, les résultats acquis soulignent un marquage de l'environnement marin, par des radioéléments artificiels émetteurs gamma, qui est qualitativement et quantitativement plus important entre Carteret est Fermanville. De part et d'autre, les niveaux chutent et, concernant les caps précités, on remarque qu'ils peuvent être plus influencés par les eaux marquées par les rejets industriels comme en témoignent les mesures faites dans les sédiments. Ce constat dans la région Nord-Ouest Cotentin est à mettre en relation avec une concentration d'industries nucléaires et des conditions hydrodynamiques particulières.

Cependant, les espèces biologiques « consommables » restent faiblement marquées : les moules prélevées hors de la zone de Carteret à Fermanville ne présentent pas d'activité significatives et les mollusques (patelles) collectés le long du littoral ne présentent que des activités inférieures ou de l'ordre du Bq/kg frais (≤ 5 Bq/kg sec) sauf pour ^{106}Ru. De même, les sables de plages prélevés à proximité de l'émissaire de rejet de l'usine de retraitement de La Hague, installation qui influence l'ensemble du littoral, ne sont que faiblement marqués (généralement ≤ 1 Bq/kg sec) ; un ordre de grandeur sépare les activités dans les sables de celles dans les sédiments fins. Mais les sédiments restent une importante réserve de radioéléments de période physique supérieure à 5 ans (^{60}Co, ^{137}Cs et ^{241}Am) qui peut être qualifiée de source potentielle, diffuse et différée, de radionucléides dissous pour la colonne d'eau (Boust, 1998).

Tableau 4 : Radioéléments artificiels émetteurs gamma dosés dans les échantillons collectés en milieu marin le long du littoral normand (de Cancale au Tréport) lors des campagnes de printemps 1997 (du 04/04 au 26/05/97) et d'automne 97 (du 12/11 au 12/12/97).

		^{54}Mn	^{60}Co	^{106}Ru	^{110m}Ag	^{129}I	^{131}I	^{137}Cs	^{241}Am
Sédiments fins immergés	**Maxi - Mini** **Lieu** **Ld** **Fréquence**	0,8-1,5 FMV 0,4<Ld<1,8 2/34	1,5-55 FMV 34/34	15-30 FMV 3,0<Ld<13 4/34	- 0,4<Ld<1,7 0/34	NR	NR	2,2-18 HCV 34/34	1,0-5,3 FMV 0,5<Ld<6,6 27/34
Sable de plages	**Maxi - Mini** **Lieu** **Ld** **Fréquence**	- 0,4<Ld<0,6 0/7	0,6-6,9 GRY Ld<0,4 6/7	- 2,9<Ld<5,2 0/7	- 0,4<Ld<0,6 0/7	NR	NR	0,5-2,2 GRY 7/7	- 1,2<Ld<4,2 0/7
Algues Fucus serratus	**Maxi - Mini** **Lieu** **Ld** **Fréquence**	- 0,5<Ld<1,0 0/34	1,8-14 DLT/ADV/BEG 34/34	4,5-20 BEG 3,9<Ld<7,0 14/34	0,5-1,2 DLT 0,5<Ld<0,9 4/34	3,3-71 BEG 34/34	0,6-1,3 PEB 0,8<Ld<1,1 2/6	0,5-1,5 CBG 0,5<Ld<0,6 24/34	- 0,6<Ld<1,0 0/34
Patelles	**Maxi - Mini** **Lieu** **Ld** **Fréquence**	- 0,4<Ld<3,0 0/32	0,6-4,2 GRY 0,6<Ld<3,2 12/32	4,6-12 BEG 3,3<Ld<24 4/32	0,5-5,2 SVC 0,4<Ld<3,0 8/32	0,6-1,6 BEG 0,5<Ld<1,4 4/16	- 1,0<Ld<32 0/16	0,5-0,7 TPT 0,4<Ld<2,6 4/32	- 0,4<Ld<2,2 0/32
Moules	**Maxi - Mini** **Lieu** **Ld** **Fréquence**	- 1,5<Ld<4,4 0/23	2,2 CTR 1,7<Ld<4,4 1/23	- 13<Ld<38 0/23	- 1,4<Ld<4,5 0/23	- 1,2<Ld<2,0 0/12	NR	- 1,5<Ld<4,1 0/23	- 1,2<Ld<3,3 0/23
Autes bio-indicateurs	**Maxi - Mini** **Lieu** **Ld** **Fréquence**	- 1,5<Ld<2,8 0/6	- 2,4<Ld<2,8 0/6	- 12<Ld<24 0/6	- 1,4<Ld<2,9 0/6	- 1,3<Ld<2,1 0/4	- 10<Ld<18 0/3	- 1,5<Ld<2,7 0/6	- 1,3<Ld<2,2 0/6

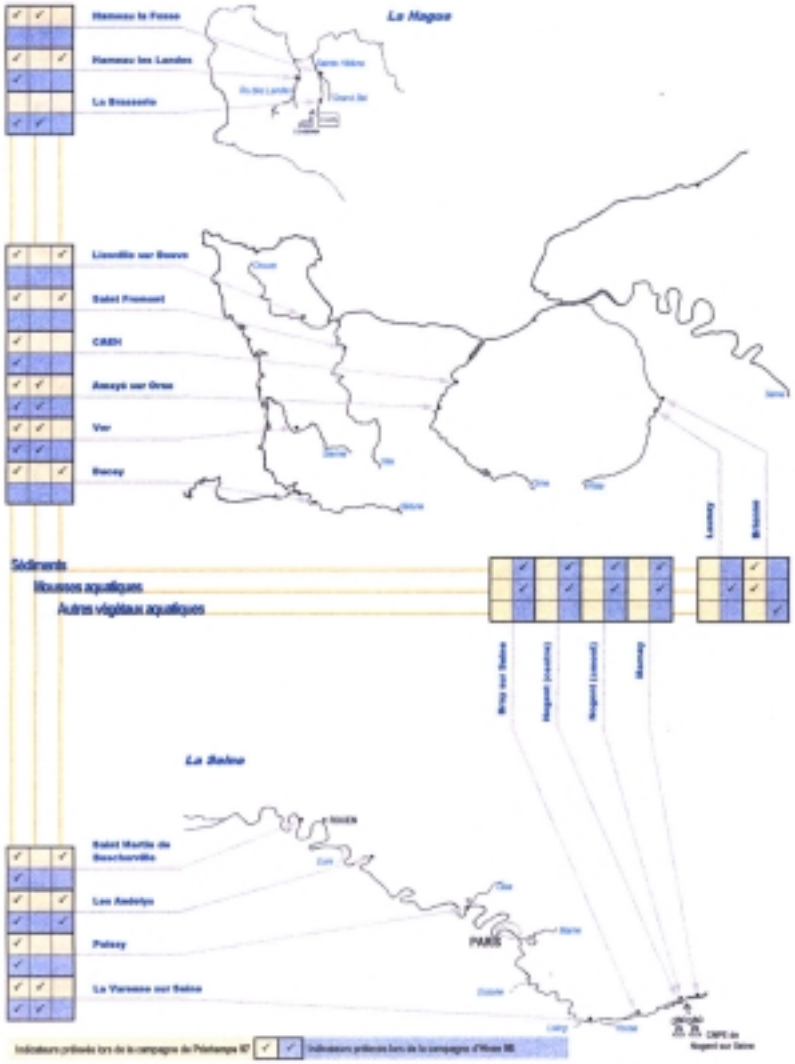
Maxi - Mini : Gamme de variation des concentrations significatives (Bq/kg sec)
Lieu : Notation en abrégé du lieu de prélèvement où l'activité est maximale. (voir carte 1 p. 12)
Ld : Gamme de variation des limites de détection (Bq/kg sec) ; indication à prendre en compte lorsque le radioélément dans l'échantillon concerné n'est pas détecté.
Fréquence : Nombre de valeurs significatives sur nombre de déterminations effectuées.

Nota : Les gammes de variation des limites de détection présentées pour les sédiments ne tiennent pas compte des valeurs pour Cherbourg, celles-ci étant en général beaucoup plus élevées (un facteur 2) du fait d'une faible quantité analysée. De même, pour les moules, les limites de détection de l'échantillon collecté à Fécamp ne sont pas prises en compte.
Les indications en **bleu** dans le tableau concernent les radioéléments étudiés uniquement sur la période automne 1997.

LE MILIEU AQUATIQUE CONTINENTAL : ETAT DES LIEUX

Prélèvements effectués dans le milieu aquatique continental
Les radioéléments artificiels détectés

Résultats
La Douve, La Vire, La Risle...
La Seine
La Sainte Hélène
L'Orne
Bilan du milieu aquatique continental



Carte 2 : Prélèvements effectués dans le milieu aquatique continental lors des campagnes de Printemps 1997 et d'Hiver 1998

QUELS SONT LES RADIOELEMENTS ARTIFICIELS DETECTES ET D'OU PROVIENNENT-ILS ?

Parmi les radioéléments artificiels émetteurs gamma recherchés dans le milieu aquatique continental, sept ont été détectés (cf. tableau 5).

Mises à part les retombées anciennes (essais nucléaires aériens et accident de Tchernobyl) qui ont influencés l'ensemble du territoire français et qui se traduisent par la présence de ^{137}Cs, les contributions à prendre en compte sont généralement locales et les zones influencées limitées. Aussi, à la différence du milieu marin, l'origine des radioéléments décelés est discutée avec les résultats des mesures (présentés par cours d'eau).

Tableau 5 : Radioéléments artificiels détectés dans les cours d'eau étudiés

Dénomination		Période
cobalt 58	^{58}Co	71 j
cobalt 60	^{60}Co	5,3 a
argent 110m	^{110m}Ag	250 j
iode 129	^{129}I	15 700 000 a
iode 131	^{131}I	8 j
césium 137	^{137}Cs	30 a
américium 241	^{241}Am	433 a

LA DOUVE, LA VIRE, LA RISLE...

Parmi les principaux cours d'eau qui alimentent les eaux marines côtières, la Douve, la Vire, la Sienne, la Sélune et la Risle ont fait l'objet d'analyses. Les compartiments échantillonnés étaient les sédiments et les indicateurs végétaux comme les phanérogames ou les mousses dulçaquicoles. En terme de prélèvements, si tous les cours d'eau évoqués ont été étudiés au printemps, en revanche seuls ceux où il était possible de prélever des mousses aquatiques ont fait l'objet d'un suivi en automne-hiver : la Risle et la Sienne.

A noter que le Ru des Landes, situé sur le plateau de la Hague, a également fait l'objet d'analyses au printemps comme en automne-hiver.

Résultats

Dans les sédiments (cf. tableau 6 et 7), ^{137}Cs est le seul radioélément artificiel identifié. Il est systématiquement détecté, et les concentrations varient entre 0,7 Bq/kg sec (la Risle ; le 08/07/97) et principalement 15 Bq/kg sec (la Douve ; le 21/05/97) ; l'activité maximale étant de 21 Bq/kg sec dans le Ru des Landes.

Dans les phanérogames et les mousses dulçaquicoles, aucune activité significative en ^{137}Cs n'est relevée. En hiver, le dosage de ^{131}I dans les végétaux aquatiques collectés a permis de déceler sa présence dans la Risle. ^{131}I est présent à la fois juste en amont de la jonction avec la Charentone (à Launey), où l'activité

dans les *Fontinalis* est de 56 Bq/kg sec, mais aussi, en aval, à Brionne où le niveau dans les *Myriophyllum* est de 20 Bq/kg sec. L'origine de ce radioélément est a priori médicale.

Tableaux 6 et 7 :
Activités (Bq/kg sec) de ^{137}Cs et ^{131}I dans des sédiments et végétaux aquatiques collectés dans le domaine aquatique continental étudié.

Printemps 1997 (tableau 6)	^{137}Cs	^{131}I	
Le Ru des Landes (25/05/97)			
Sédiments	21 ± 2	NR	
Phanérogame *Callitriche platycarpa*	< 7,7	NR	
La Sélune - Ducey (26/05/97)			
Sédiments	3,3 ± 0,7	NR	
Mousse aq. *Fontinalis antipyretica*	< 20	NR	
La Sienne - Ver (08/07/97)			
Sédiments	4,0 ± 0,7	NR	
Phanérogame *Ranunculus sp*	< 9,0	NR	
La Douve - Liesville (21/05/97)			
Sédiments	15 ± 3	NR	
Phanérogame *Spirodela polyrhiza* et *Lemna minor*	< 6,7	NR	
La Vire - St Fremont (25/05/97)			
Sédiments	3,0 ± 0,7	NR	
Nénuphars	< 1,2	NR	
La Risle - Brionne (08/07/97)			
Sédiments	0,7 ± 0,5	NR	
Mousse aquatique *Rhynchostegium riparioides*	< 13	NR	

NR signifie Non Recherché.

Hiver 1998 (tableau 7)	^{137}Cs	^{131}I
Le Ru des Landes (23/02/98)		
Sédiments	**8,7 ± 1,1**	< 3,9
La Sienne - Ver (25/02/98)		
Sédiments	**3,0 ± 0,8**	< 3,2
Mousse aq. *Fontinalis*	< 2,4	< 3,8
La Risle - Brionne (22/02/98)		
Phanérogame *Myriophyllum sp.*	< 6,0	**20 ± 5**
La Risle - Launey (22/02/98)		
Mousse aq. *Fontinalis*	< 4,2	**56 ± 12**

La Seine

Initialement, quatre stations de prélèvement ont été prises en référence entre la Varenne-sur-Seine située en amont de Paris et Saint Martin de Boscherville, à 25 km en aval de Rouen. Pour chacun des sites, sédiments et végétaux aquatiques ont été collectés. En hiver 98 (le 10/02/98), des prélèvements supplémentaires de sédiments et de mousses dulçaquicoles du genre *Fontinalis* ont été effectués dans l'environnement proche du CNPE de Nogent sur Seine : entre Marnay (≈ 5 km en amont) et la Varenne-sur-Seine (≈ 40 km en aval).

Résultats

Sur la période étudiée, cinq radioéléments artificiels émetteurs gamma sont identifiés : ^{58}Co, ^{60}Co, ^{110m}Ag, ^{131}I et ^{137}Cs.

Tableau 8 : Activités (Bq/kg sec) en potassium 40 (^{40}K), teneurs en Carbone Organique Total (COT) et granulométrie (cumul des argiles et des limons fins et grossiers) des sédiments prélevés le long de la Seine durant les campagnes de Printemps 97 et d'Hiver 98.

	40K	COT	• 50µm
St Martin de Boscherville			
le 07/04/97	323 ± 51	-	-
le 11/02/98	335 ± 28	4,78%	62,7%
Les Andelys			
le 09/04/97	192 ± 41	-	-
le 11/02/98	355 ± 31	4,54%	58,1%
Poissy			
le 08/07/97	288 ± 28	-	-
le 11/02/98	337 ± 28	5,28%	73,1%
La Varenne sur Seine			
le 08/07/97	264 ± 37	-	96,7%
le 10/02/98	380 ± 45	4,39%	57,0%
Bray sur Seine			
le 10/02/98	186 ± 19	2,18%	52,3%
Nogent sur Seine (centre)			
le 10/02/98	86 ± 16	0,72%	20,2%
Nogent sur Seine (amont)			
le 10/02/98	123 ± 21	1,26%	39,6%
Marnay sur Seine			
le 10/02/98	226 ± 27	2,69%	76,2%

^{137}Cs, le plus courant, est systématiquement détecté dans les sédiments avec des activités inférieures ou égales à 11 Bq/kg sec et ponctuellement dans les végétaux aquatiques : 3,2 et 1,8 Bq/kg sec dans les *Fontinalis* prélevées respectivement à la Varenne sur Seine le 08/07/97 et à Nogent sur Seine (amont) le 10/02/98. A proximité de la centrale nucléaire de Nogent sur Seine, ^{137}Cs est

présent dans les sédiments à des activités équivalentes entre l'amont (Marnay) et l'aval. Les différences de concentrations peuvent être imputées principalement à la variabilité de la granulométrie et de la teneur en matière organique (C.O.T.) des masses sédimentaires analysées (voir tableau 8). ^{137}Cs proviendrait essentiellement des retombées anciennes (essais nucléaires aériens et accident de Tchernobyl), auxquelles peut s'ajouter une très faible partie issue des effluents liquides de la centrale puisque ce radioélément entre dans leur composition.

D'autres radioéléments (^{60}Co, ^{58}Co, ^{110m}Ag et ^{131}I) caractéristiques des rejets des R.E.P. sont également détectés occasionnellement en aval de l'installation à des concentrations qui n'excèdent pas 12 Bq/kg sec (^{58}Co) dans les *Fontinalis* et 3 Bq/kg sec (^{60}Co) dans les sédiments. Les résultats montrent que l'influence de la centrale s'étend au moins jusqu'à la Varenne sur Seine où la diminution des activités en hiver par rapport au printemps pourrait s'expliquer, entre autre, par les conditions de rejets qui ne sont pas constantes dans le temps.

Plus en aval, de Poissy à Saint Martin de Boscherville, seuls deux radioéléments artificiels sont décelés : ^{60}Co, uniquement à l'état de trace (≤ 1Bq/kg sec) dans les sédiments, et ^{131}I, à la fois dans les sédiments (≤ 18 Bq/kg sec) et dans les végétaux aquatiques parmi lesquels, les algues prélevées le 11/02/98 aux Andelys présentent la plus forte valeur (135 Bq/kg sec).

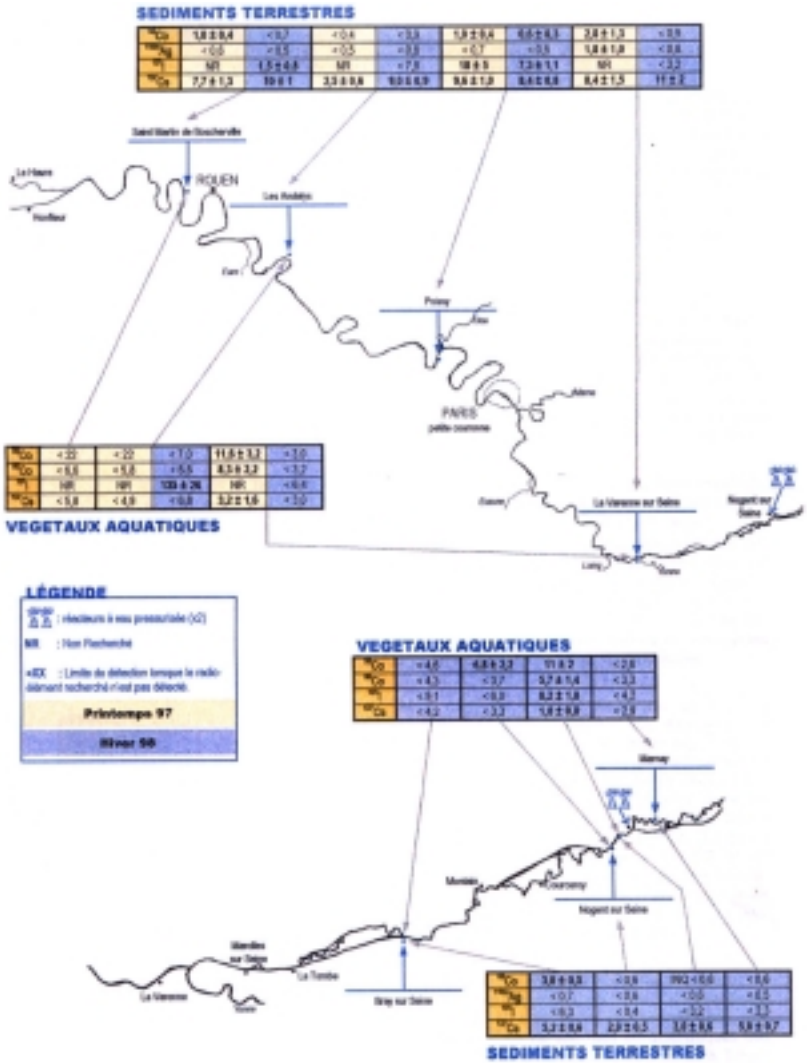
Concernant leur origine, ^{131}I proviendrait de son utilisation à des fins médicales et ^{60}Co ,décelé à Saint Martin de Boscherville, aurait une origine marine. En effet, des particules marines peuvent être transportées en suspension jusqu'à la Bouille, soit à une centaine de kilomètre en amont de l'embouchure, au moins en période d'étiage (Boust, 1996).

En comparaison, en 1997 :

Activités maximales et fréquences de détection de radionucléides artificiels dans les échantillons collectés dans le domaine aquatique continental lors du suivi radioécologique 1997 de l'environnement des centrales nucléaires françaises.

	Activité en Bq / kg sec						
	^{137}Cs	^{134}Cs	^{58}Co	^{60}Co	^{110m}Ag	^{54}Mn	^{131}I
Sédiments	32,8 (55/55)	0,59 (16/55)	1,7 (11/55)	3,83 (26/55)	1,44 (13/55)	0,2 (1/55)	NR
Phanérogames semi-aquatiques	3,3 (22/28)	0,3 (1/28)	-	1,6 (3/28)	1,2 (1/28)	-	NR
Phanérogames immergées	7,5 (33/40)	-	71 (21/40)	62,7 (15/40)	-	11,4 (4/40)	175 (4/4)
Mousses aquatiques	15,6 (24/24)	0,6 (2/24)	66,7 (16/24)	54 (16/24)	2,5 (6/24)	11 (6/24)	99 (18/20)

Source : Vray et al., 1997



Carte 3 : Activités (Bq/kg sec) des radioéléments atrficiels émetteurs gamma dosés dans les sédiments et les végétaux aquatiques collectés le long de la Seine durant les campagnes de printemps 97 et d'hiver 98.

LA SAINTE HELENE

Le CSM a été le premier centre français destiné au stockage de déchets radioactifs de faible ou moyenne activité. Il a été exploité de novembre 69 à juin 94 ; un peu plus de 525 000 m^3 de déchets y ont été entreposés, ce qui représente 41 042 000 GBq pour les émetteurs $\beta\gamma$ et 346 400 GBq pour les émetteurs α (estimation ANDRA, 1994, pour le compte de la *commission d'évaluation de la situation du Centre de Stockage de la Manche).*

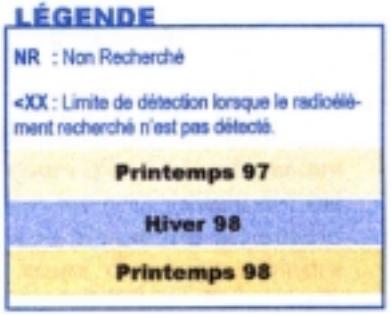
Initialement, la station de prélèvement choisie était située à Hameau la Fosse afin de tenir compte, autant que possible, de toutes les contributions du versant Nord. S'il a été possible de prélever sédiments et mousses aquatiques au printemps (le 25/05/97), en revanche, pour la période d'hiver 98 (le 23/02/98), l'absence de végétaux aquatique nous a contraint à prélever plus près de la source : à la Brasserie.

De plus, des résultats ACRO sont rapportés dans le but de compléter le bilan ; ils concernent une campagne de prélèvements effectuée le 1er juillet 1998.

Résultats

Avec la création du Centre de Stockage de la Manche (CSM), la Sainte Hélène a subit des aménagements. Alimentée artificiellement par captage dans les nappes phréatiques, le cours d'eau a également recueilli des eaux provenant du réseau

pluvial et/ou séparatif (eau en contact avec les ouvrages de stockage) selon une gestion qui a notablement évolué au fil des années. Depuis 1988, seules les eaux pluviales, en cas de forte pluviosité, peuvent rejoindre la Sainte Hélène.



Carte 4 : Activités (Bq/kg sec) des radioéléments atrficiels émetteurs gamma dosés dans les sédiments et les mousses aquatiques collectés le long de la Sainte-Hélène en 1997-98.

Le mode de gestion initial des eaux du centre associé à divers incidents, comme les débordements accidentels du réseau séparatif, ont conduit aux rejets non contrôlés de radioéléments dans le cours d'eau.

Ainsi, le long de la Sainte Hélène, quatre radioéléments artificiels émetteurs gamma sont détectés (^{60}Co, ^{129}I, ^{137}Cs et ^{241}Am), tous de demi-vie supérieure à 5 ans. En terme d'activité, les niveaux enregistrés dans les compartiments apparaissent globalement stables sur la période étudiée, particulièrement pour ^{129}I et ^{137}Cs, et décroissent avec l'éloignement à la source comme en témoignent les mesures faites dans les mousses dulçaquicoles.

Par ailleurs, dans les mousses aquatiques où tous les radioéléments ont pu être détectés (La Brasserie ; le 23/02/98), on note la présence systématique de ^{129}I (de 46 à 75 Bq/kg sec) et ponctuellement de ^{241}Am (4,0 Bq/kg sec), radioéléments non décelés dans les autres cours d'eau étudiés. Quant aux activités en ^{60}Co (14 et 48 Bq/kg sec) et ^{137}Cs (33 et 39 Bq/kg sec) relevées à la Brasserie, ce sont les plus fortes valeurs enregistrées en milieu continental aux cours de l'étude.

Concernant ces valeurs plus significatives, on remarque dans les sédiments, où seuls ^{60}Co (≈1 Bq/kg sec) et ^{137}Cs (de 50 à 60 Bq/kg sec) sont détectés, que les activités en ^{137}Cs ne sont pas caractéristiques des seules retombées antérieures et postérieures à Tchernobyl. Un excès de ^{137}Cs est observé. Ce phénomène transparaît très nettement lorsque les activités sont normalisées à la granulométrie : en hiver 98 par exemple, un ordre de grandeur (au minimum)

sépare l'activité normalisée obtenue à la Brasserie (716 Bq/kg sec ≤50µm) de celles relevées dans les autres cours d'eau (de 6,6 à 31 Bq/kg sec ≤50µm).

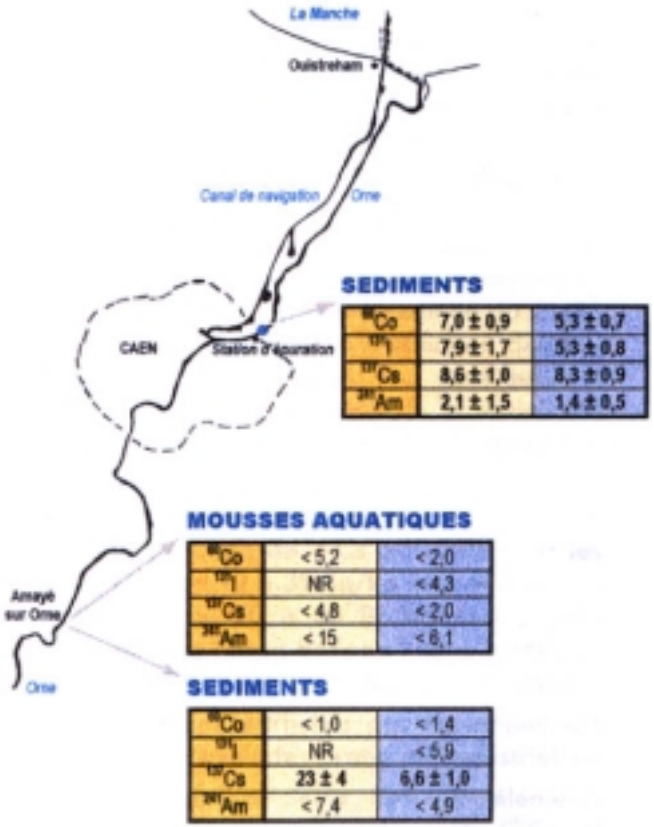
Finalement, la présence de ^{129}I, ^{60}Co, ^{241}Am et d'un excès de ^{137}Cs confirmerait l'influence du Centre de Stockage de la Manche sur le cours d'eau. Cependant, pour ^{129}I, il n'est pas exclu qu'une partie de cet élément provienne des effluents gazeux de l'usine de retraitement située à proximité. Dans ce cas, on peut supposer que ^{129}I déposé au sol rejoindrait le cours d'eau avec les eaux de ruissellement.

L'ORNE

Le long de l'Orne, des prélèvements ont été effectués à la fois en aval et en amont de la ville de Caen, les 09/07/97 et 25/02/98. Il s'agissait de tenir compte des apports de la station d'épuration qui couvre le district de Caen, mais également, d'une éventuelle contribution située en amont de l'agglomération.

Résultats

En aval de Caen, le tronçon étudié est soumis à l'influence des eaux douces de l'Orne mais également des eaux marines, principalement en période d'étiage puisque le barrage de Caen est fermé. Les sédiments marins peuvent donc remonter dans l'estuaire où ils subissent une dilution, d'origine tellurique, par les suspensions apportées par la rivière, surtout en période de crue (Auffret *et al.*, 1985).



LÉGENDE

NR : Non Recherché

<XX : Limite de détection lorsque le radioélément recherché n'est pas détecté.

Printemps 97

Hiver 98

Printemps 98

Carte 5 : Activités (Bq/kg sec) des radioéléments artificiels émetteurs gamma dosés dans les sédiments et les mousses aquatiques collectés le long de l'Orne durant les campagnes de printemps 97 et d'hiver 98.

Cette influence marine se traduit par la présence de ^{60}Co (5,3 et 7,0 Bq/kg sec) et ^{241}Am (1,4 et 2,1 Bq/kg sec), radioéléments rejetés en mer par l'usine de retraitement de La Hague, à des teneurs proches de celles observées dans les sédiments littoraux.

Par ailleurs, ^{131}I et ^{137}Cs sont également identifiés dans les sédiments. Le premier, caractéristique des applications médicales, est décelé uniquement en aval de l'agglomération caennaise (5,3 et 7,9 Bq/kg sec) où il se trouverait introduit par les rejets de la station d'épuration des eaux usées du district de Caen. Quant au ^{137}Cs, il est détecté tout le long de l'Orne et son activité varie de 6,6 à 23 Bq/kg sec (valeur atypique qui est très probablement à relier aux caractéristiques physico-chimiques de la masse sédimentaire analysée). De plus, à Amayé sur Orne, situé à 20 km en amont de Caen, ^{137}Cs est le seul radioélément artificiel à être détecté.

^{137}Cs provient essentiellement des retombées anciennes (essais nucléaires aériens et accident de Tchernobyl), auxquelles peut s'ajouter (en aval de Caen) une faible partie issue des effluents liquides des installations nucléaires côtières puisque ce radioélément entre dans leur composition.

Bilan du milieu aquatique continental

En milieu continental, des mesures de radioactivité gamma d'origine artificielle ont été faites dans les principaux cours d'eau qui alimentent les eaux marines côtières. Si au printemps 97, tous les cours d'eau ont été étudiés, en revanche, seules la Seine, la Risle et la Sienne ont été suivies durant la période d'hiver 98. De plus, deux cours d'eau de moindre importance situés sur le plateau de La Hague, ont fait l'objet d'analyses ; en hiver, des prélèvements supplémentaires ont été effectués dans la Seine, en amont de Paris, à proximité du CNPE de Nogent-sur-Seine.

Les compartiments échantillonnés étaient les sédiments et divers indicateurs végétaux dont, principalement, les mousses dulçaquicoles puisque de nombreux travaux in situ ont confirmé qu'elles constituent de bien meilleurs indicateurs de la pollution radioactive que les sédiments, les végétaux immergés et les poissons (Baudin *et al.*, 1991).

Résultats

Sur la période étudiée, sept radioéléments artificiels gamma sont identifiés. Cependant, la radioactivité artificielle reste due principalement au ^{137}Cs, radioélément systématiquement détecté dans les sédiments (fig. S) et rarement dans les végétaux aquatiques.

Pour expliquer la présence de cet élément, il est d'abord nécessaire de considérer les retombées des essais atmosphériques de l'arme atomique dont la répartition spatiale est homogène dans l'hémisphère nord (Calmet, 1986). Puis, de prendre en compte les retombées de l'accident de Tchernobyl qui ont influencé le territoire français avec un gradient décroissant d'Est en Ouest (Ph. Renaud *et al.*, 1997).

Ces contributions passées ont conduit à un marquage rémanent des différents compartiments de l'environnement, principalement dû aux retombées des essais atmosphériques dans l'Ouest de la France, qui serait relayé pour les écosystèmes aquatiques par les apports que représentent les eaux qui drainent les bassins versants encore contaminés.

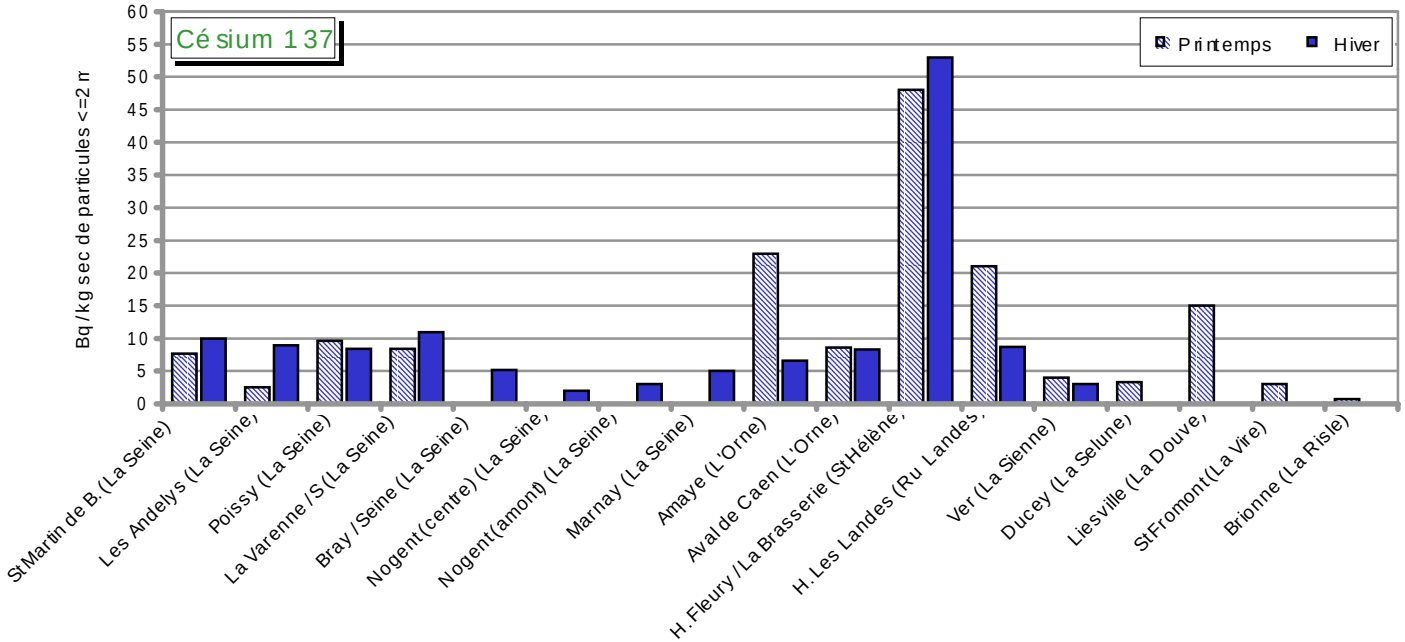


Figure S : Activités (Bq/kg sec) en ^{137}Cs des sédiments prélevés dans les cours d'eau étudiés au printemps 97 et en hiver 98. L'absence de valeur correspond à un prélèvement non effectué.

Ainsi, les teneurs en ^{137}Cs (cf. fig. S) inférieures ou de l'ordre d'une dizaine de Bq/kg sec mesurées dans les sédiments sont à rapprocher de ces contributions passées, y compris dans la Seine à proximité du CNPE de Nogent-sur-Seine. La dispersion des valeurs (de 0,7 à 23 Bq/kg sec) peut quant à elle être imputée, en partie, à la variabilité des caractéristiques physico-chimiques des masses sédimentaires.

Cependant, on constate dans la Sainte-Hélène un excès de ^{137}Cs à la fois dans les végétaux (de 13 à 39 Bq/kg sec) et dans les sédiments (de 50 à 60 Bq/kg sec) ; cette élévation du « bruit de fond » est à mettre en relation avec la présence du Centre de Stockage de la Manche (C.S.M.).

En dehors du ^{137}Cs, d'autres radioéléments artificiels ont également été observés en quelques endroits en relation avec des pratiques industrielles.

Dans la Seine en aval du CNPE de Nogent-sur-Seine, des radioéléments artificiels sont occasionnellement détectés dans les sédiments (^{60}Co et ^{110m}Ag) et dans les mousses aquatiques (^{58} et ^{60}Co et ^{131}I) à des concentrations respectivement inférieures ou égales à 3 et 12 Bq/kg sec. Ce faible marquage des compartiments étudiés par des radioéléments caractéristiques des effluents liquides de la centrale nucléaire souligne l'influence de cette dernière sur le milieu aquatique, tout au moins jusqu'à la Varenne-sur-Seine (≈ 40 km en aval).

Sur le plateau de La Hague dans la Sainte Hélène, d'autres radioéléments que ^{137}Cs sont également détectés dans les mousses aquatiques (^{129}I, ^{60}Co et ^{241}Am) et dans les sédiments (^{60}Co) à des concentrations respectivement inférieures ou égales à 75 et 1 Bq/kg sec. Leurs présences confirmeraient l'impact du Centre de Stockage de la Manche où sont entreposés divers déchets de catégorie A issus de l'industrie nucléaire. A noter que, pour ^{129}I, il n'est pas exclu qu'une partie de cet élément provienne des effluents gazeux de l'usine de retraitement située à proximité.

Dans les milieux estuariens, ^{60}Co et ^{241}Am sont détectés dans les sédiments de l'Orne en aval de Caen à des teneurs proches de celles relevées dans les sédiments marins le long du littoral. ^{60}Co est également décelé dans la Seine en aval de Rouen à l'état de trace (≤ 1 Bq/kg sec). Ces radioéléments ont une origine marine.

Par ailleurs, la recherche occasionnelle de ^{131}I, en raison de sa courte période physique, a permis de détecter cet élément à la fois dans les végétaux aquatiques (algues, *Myriophyllum* et *Fontinalis*) et dans les sédiments de certaines stations de prélèvement.

Si à proximité de la centrale de Nogent-sur-Seine, les mousses aquatiques témoigneraient des rejets d'effluents liquides de cette installation, pour les autres lieux, ^{131}I proviendrait de son utilisation à des fins médicales. Introduit dans le réseau de collecte des eaux usées, soit par les hôpitaux, soit par les patients eux-mêmes via leurs urines, ^{131}I serait en partie libéré dans les écosystèmes aquatiques avec les effluents traités par les stations d'épuration. Il y a donc là une source de nature diffuse parce que variable dans l'espace et dans le temps du fait que les patients peuvent être considérés comme terme source.

En relation avec cette origine médicale, ^{131}I est observé dans la Seine en aval de Paris, dans l'Orne en aval de Caen et dans la Risle depuis l'amont de la confluence avec la Charentonne. Concernant l'impact radioécologique de cet élément, il reflète des pollutions récentes du fait de sa courte période physique (8 jours).

Tableau 9 : Radioéléments artificiels émetteurs gamma dosés dans les échantillons collectés en milieu aquatique continental lors des campagnes de printemps 1997 (du 07/04 au 08/07/97) et d'hiver 98 (du 10/02 au 25/02/98).

		Sédiments					Végétaux aquatiques					
		^{60}Co	^{131}I	^{110m}Ag	^{137}Cs	^{241}Am	^{58}Co	^{60}Co	^{129}I	^{131}I	^{137}Cs	^{241}Am
La Seine aval de Paris	**Maxi - Mini**	**0,6-1,0**	**1,5-18**	-	**2,5-10**	-	-	-	-	**135**	-	-
	Ld	0,4<Ld<0,9	Ld<7,8	0,5<Ld<0,8		0,6<Ld<2,9	7,0<Ld<22	5,8<Ld<6,8	5,0<Ld<11		4,9<Ld<6,8	5,1<Ld<14
	Fréquence	3/6	3/4	0/6	6/6	0/6	0/3	0/3	0/2	1/1	0/3	0/3
La Seine amont de Paris	**Maxi - Mini**	**2,8-3,0**	-	**1,8**	**2,0-11**	-	**6,8-11,6**	**5,7-8,3**	-	**8,2**	**1,8-3,2**	-
	Ld	0,6<Ld<0,9	2,3<Ld<6,3	0,5<Ld<0,8		0,7<Ld<2,8	2,6<Ld<4,6	3,2<Ld<4,3	1,8<Ld<3,1	4,2<Ld<9,1		1,6<Ld<8,7
	Fréquence	2/6	0/5	1/6	6/6	0/6	3/6	2/6	0/5	1/5	2/6	0/6
L'Orne aval de Caen	**Maxi - Mini**	**5,3-7,0**	**5,3-7,9**	-	**8,3-8,6**	**1,4-2,1**	Pas de prélèvements					
	Ld			0,6<Ld<0,6								
	Fréquence	2/2	2/2	0/2	2/2	2/2						
L'Orne amont de Caen	**Maxi - Mini**	-	-	-	**6,6-23**	-	-	-	-	-	-	-
	Ld	1,0<Ld<1,4	Ld<5,9	0,8<Ld<1,2		4,9<Ld<7,4	1,9<Ld<6,8	2,0<Ld<5,2	Ld<14	Ld<4,3	2,0<Ld<4,8	6,1<Ld<15
	Fréquence		0/1	0/2	2/2	0/2	0/2	0/2	0/1	0/1	0/2	0/2
La Ste Hélène	**Maxi - Mini**	**0,9-1,0**	-	-	**48-53**	-	-	**5,1-48**	**51-74**	-	**13,3-39**	**4,0**
	Ld		Ld<10	0,5<Ld<0,8		0,7<Ld<6,9	4,7<Ld<5,2			Ld<6,7		Ld<14
	Fréquence	2/2	0/1	0/2	2/2	0/2	0/2	2/2	2/2	0/1	2/2	0/1
La Risle	**Maxi - Mini**	-	NR	-	**0,7**	-	-	-	-	**20-56**	-	-
	Ld	Ld<0,8		Ld<0,7		Ld<6,8	2,0<Ld<19	2,9<Ld<14	Ld<25		4,2<Ld<13	8,6<Ld<28
	Fréquence	0/1		0/1	1/1	0/1	0/3	0/3	1/3	2/2	0/3	0/3
Autres cours d'eau	**Maxi - Mini**	-	-	-	**3,0-21**	-	-	-	-	-	-	-
	Ld	0,7<Ld<2,4	3,2<Ld<3,9	0,6<Ld<2,6		2,1<Ld<6,4	2,0<Ld<47	1,5<Ld<22	4,2<Ld<45	Ld<3,8	1,2<Ld<20	4,4<Ld<49
	Fréquence	0/7	0/2	0/7	7/7	0/7	0/5	0/5	0/4	0/1	0/5	0/5

Maxi - Mini : Gamme de variation des concentrations significatives (Bq/kg sec)
Ld : Gamme de variation des limites de détection (Bq/kg sec) ; indication à prendre en compte lorsque le radioélément dans l'échantillon concerné n'est pas détecté.
Fréquence : Nombre de valeurs significatives sur nombre de déterminations effectuées.

CONCLUSION GENERALE

L'étude de la qualité radiologique des eaux marines et continentales a été faite à partir de la mesure des concentrations des radioéléments artificiels dans divers échantillons biologiques et inertes. Cette démarche présente un double avantage : d'une part, elle permet de vérifier que ce que l'on mesure dans les indicateurs, comme les mollusques ou coquillages (objet d'une consommation), reste conforme aux normes ; d'autre part, elle fournit des éléments qui permettent d'apprécier la qualité radiologique des eaux sachant qu'il est possible, sous certaines conditions, de déterminer les niveaux théoriques de concentration moyenne dans l'eau à partir de la connaissance des « facteurs de concentration » (Fc) et des « coefficients de distribution » (Kd). Dans ce dernier contexte, les compartiments étudiés, comme les sédiments ou les algues, sont alors d'un grand intérêt ; ils offrent l'avantage d'amplifier et de stabiliser dans le temps les teneurs présentes dans l'eau. En effet, la détection et le dosage directs dans l'eau de polluants posent souvent les problèmes des moyens analytiques, en raison des très faibles concentrations observées, et d'interprétations eu égard à la variabilité des concentrations dans le temps.

Par ailleurs, la réponse d'un compartiment vis à vis d'un radioélément donné varie selon sa nature ; par exemple, la rétention de l'iode pour les sédiment marin est faible (Kd ≅ 500) alors que pour les algues, elle est très importante (Fc ≅ 10 000). En intégrant dans cette étude des indicateurs de nature différente, une information plus exhaustive a pu être recueillie sur la qualité radiologique des eaux.

Canalisation de rejets en mer des effluents liquides de l'usine de retraitement de La Hague (zone de marnage de l'anse des Moulinets)

Néanmoins, l'approche retenue dans cette étude ne peut constituer une solution universelle en raison de l'existence d'éléments dits « conservatifs », comme l'antimoine 125 (^{125}Sb), qui ne présentent pas (ou très peu) d'affinité avec les constituants du milieu ; l'absence de résultats significatifs pour les compartiments étudiés ne signifie nullement qu'ils ne sont pas présents dans l'eau mais tout simplement que « l'indicateur » sélectionné n'est pas adapté à rendre compte de leur présence.

Malgré ces limites pour les éléments conservatifs, les données acquises constituent, principalement pour le milieu marin, un complément d'information intéressant en regard des précédents travaux. En accord avec le découpage géographique, il a été possible (1) de fournir un bilan assez complet vis à vis de l'impact des rejets en Manche de radioéléments artificiels émetteurs gamma ; (2) de renseigner sur la qualité radiologique d'étendues marines qui sont, à priori, peu ou pas surveillées parce qu'elles sont éloignées des émissaires de rejets ; (3) d'actualiser les données acquises il y a dix ans sur les moules et fucus le long des côtes de la Manche (Germain *et al.*, 1990) ; (4) de fournir des profils de distribution longitudinaux pour les principaux éléments mesurés ; (5) d'apporter des informations nouvelles quant à la distribution de ^{129}I dont les rejets industriels (retraitement) augmentent proportionnellement à la production.

Ultérieurement, il serait intéressant en milieu marin de continuer le travail engagé sous la forme d'un suivi bisannuel de quelques stations. En fonction de la connaissance acquise sur les mouvements des éléments à l'état de trace et des résultats obtenus, il sera possible, dans des conditions normales de rejets, d'en déduire des informations pour des zones ne faisant pas l'objet de mesures. Concernant ^{129}I, une étude complémentaire serait tout à fait indiquée pour apporter plus de précision sur sa répartition lors du transit du Nord-Cotentin vers la Baie de Seine puisqu'une rupture du gradient de décroissance a été constatée dans cette zone. En milieu continental, il serait intéressant de mieux cerner les répercussions de l'apport diffus en ^{131}I puisque de nombreux cours d'eau peuvent être concernés de manière variable dans le temps.

Par ailleurs, des efforts devront être également faits vis à vis d'autres radioéléments (émetteurs bêta purs et alpha purs) dans l'optique de disposer d'une connaissance plus exhaustive de la radioactivité artificielle présente sur le bassin Seine-Normandie. Il conviendra alors d'étendre le travail engagé à des radioéléments non pris en compte dans cette étude, et dont les niveaux dans l'environnement augmentent parallèlement à un accroissement de la production et/ou à un changement de stratégie dans la gestion des rejets et des déchets : ^{3}H, ^{14}C, etc..

REMERCIEMENTS

Pour leur participation à la campagne de prélèvement :

G. Clarebout , J. Guillevic, L. Poncet, G. Thouin et toute l'équipe de l'antenne Nord-Cotentin.

Pour la détermination des végétaux aquatiques :

Le Dr Deperier et le Pr. Lecointe*, du laboratoire de Botanique et de Phytogéographie de l'Université de Caen.

Pour la réalisation des analyses de granulométrie :

Mme Hurel et le Dr Brun-Cottan du laboratoire de Géomorphologie (CNRS de Caen).

Pour la réalisation des analyses de carbone organique total :

M. Quillard et le Dr Valter du laboratoire de Géomorphologie (CNRS de Caen).

* une pensée particulière à notre ami, Alain Lecointe, Lychenologue passionné, décédé des suites d'une grave maladie.

Pour leur collaboration à la réalisation de l'étude :

Joël Cosson, Professeur au laboratoire de Biologie et Biotechnologie Marine de l'Université de Caen.

Pierre Barbey, Maître de conférences en Biochimie à l'Université de Caen et Conseiller Scientifique de l'A.C.R.O.

Jean-Paul Auffret, Professeur au laboratoire de Géologie Marine de l'Université de Caen.

Que chacun trouve ici l'expression des plus sincères remerciements de L'A.C.R.O.

Nous remercions Sarah Colomb, Mylène Josset, Didier Gouardos et Laurent Poncet pour leur relecture assidue du document.

Nous tenons également à remercier Eric Gourdin, Garde National de la chasse et de la faune sauvage, brigade Ouest (Bernay), pour son assistance lors de la campagne de prélèvement.

ANNEXE
INFORMATIONS REGLEMENTAIRES CONCERNANT LA PROTECTION SANITAIRE DE LA POPULATION CONTRE LES DANGERS DES RAYONNEMENTS IONISANTS

Le dispositif réglementaire en vigueur en France s'appuie sur des *Limites Annuelles d'Incorporation* (L.A.I.) -voir tableau 10- qui peuvent être succinctement définies comme l'activité total (en Bq) qui, incorporée dans l'organisme (en une année), conduirait à une Limite Annuelle d'Exposition de 5 mSv pour le public / décret n°88-521 du 18 avril 1988/.

Tableau 10 : Radiotoxicité et Limites Annuelles d'Incorporation (L.A.I.) des radioéléments mesurés ; extraits du Décret n° 88-521 du 18 avril 1988/.

Radioélément	Groupe de radiotoxicité	L.A.I. (en MBq)
Manganèse 54	Modérée (3)	7,0
Cobalt 58	Modérée (3)	5,0 - 6,0 selon forme chimique
Cobalt 60	Forte (2)	0,7 - 2,0 selon forme chimique
Ruthénium 106	Forte (2)	0,7
Argent 110 métastable	Forte (2)	2,0
Iode 129	Faible (4)	0,02
Iode 131	Forte (2)	0,1
Césium 137	Modérée (3)	0,4
Américium 241	Très forte (1)	0,005

Cependant, la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), qui conseil les états membres, préconise un nouveau mode de raisonnement (recommandation n°60 de 1990) basé sur l'utilisation de Coefficients de dose et non plus de L.A.I. Ces Coefficients de doses traduisent la dose efficace engagée (en Sv) reçue par individu, en fonction de l'âge et du mode de contamination, pour chaque Bq de tel ou tel radioélément incorporé. Cette nouvelle notion est importante : ces coefficients de dose ont été retenus par la Directive Européenne du 13 mai 1996 (Directive 96/29/Euratom) et devront être appliqués au plus tard le 13 mai 2000 dans les états membres. De même, la Limite Annuelle d'Exposition fixée en France à 5 mSv/an pour le public devra être modifiée puisque la réglementation Européenne n'admet que 1 mSv/an pour le public. Aussi, nous faisons par la suite référence à la Directive Européenne du 13 mai 1996.

Dans le but d'apprécier le risque sanitaire lié à la consommation d'espèces potentiellement contaminées, nous présentons dans le tableau 11 les valeurs de coefficients de dose par ingestion pour chaque radioéléments détectés. Deux valeurs sont rapportées : l'une pour un enfant de 7 à 12 ans et l'autre pour un adulte. Cette distinction a l'intérêt de montrer que, bien souvent, pour une même activité incorporée, un enfant recevra une dose efficace environ deux fois plus importante que celle reçue par un adulte.

Tableau 11 : Coefficients de dose engagés appliqués aux enfants de 7 à 12 ans et aux adultes pour les radioéléments mesurés ; extraits de la directive européenne du 13 mai 1996 (96/29/Euratom).

Radioélément	Coefficients de doses 7-12 ans / adultes (10^{-9} Sv/Bq)
Manganèse 54	1,3 / 0,71
Cobalt 58	1,7 / 0,74
Cobalt 60	11 / 3,4
Ruthénium 106	15 / 7
Argent 110 métastable	5,2 / 2,8
Iode 129	190 / 110
Iode 131	52 / 22
Césium 137	10 / 13
Américium 241	220 / 200

Pour apprécier le risque sanitaire, d'une manière simpliste, dans le cas d'une consommation ponctuelle, il faut **pour chaque radioélément présent** dans un produit consommable (coquillages par exemple) multiplier le coefficient de dose du radioélément concerné par son activité massique exprimée en Bq/kg frais. Puis, additionner l'ensemble. La valeur résultante (exprimée en Sv) peut alors être comparée à la limite d'exposition annuelle (1 mSv).

Il convient cependant d'utiliser ces notions avec d'extrêmes précautions compte tenu que plusieurs radioéléments peuvent être incorporés qu'ils soient mesurés ou non. Rappelons que pour un calcul «exhaustif» il est nécessaire de prendre en compte, en plus des radioéléments mesurés dans l'étude à des niveaux significatifs, ceux dont on sait qu'ils sont présents mais à des niveaux inférieurs

aux limites de détection (Ld), ceux dont on sait qu'ils existent mais qui n'ont pas été mesurés et ceux non identifiés et donc non mesurés. En outre, les niveaux d'incorporation que l'on pourrait calculer à partir des données de l'étude, conduiront à des niveaux d'exposition qui relèvent des «faibles doses» ; domaine pour lequel subsistent des incertitudes.

Enfin, la limite d'exposition annuelle, comme toutes les limites, doit être considérée comme un seuil duquel on doit s'éloigner autant que possible et ceci en fonction de l'un des trois principes fondamentaux établi par la CIPR : le principe ALARA (« aussi bas que raisonnablement possible »).

LEXIQUE

SIGLES :

ACRO : Association pour le Contrôle de la Radioactivité dans l'Ouest
ANDRA : Agence Nationale pour la gestion des Déchets RAdioactifs
CEA : Commissariat à l'Energie Atomique
CIPR : Commission Internationale de Protection Radiologique
CIREA : Commission Interministérielle des Radio-Eléments Artificiels
CLI : Commission Locale d'Information
CNPE : Centre Nucléaire de Production d'Electricité
COGEMA : Compagnie Générale de Matières Nucléaires
CSM : Centre de Stockage de la Manche
CSPI : Commission Spéciale et Permanente d'Information auprès de l'établissement de La Hague
EDF : Electricité de France
IPSN : Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire
OPRI : Office de Protection contre les Rayonnements Ionisants
SPR - COGEMA : Service de Prévention et de Radioprotection de COGEMA
REP : Réacteur à Eau Pressurisée

EXPRESSIONS :

Bruit de fond : Niveau de radioactivité, naturelle voir artificielle, communément observée avec une large répartition géographique.

Ecosystème : Système biologique complexe formé par les divers organismes vivants ensemble (biocénose) dans un milieu donné (biotope).

Source diffuse : Source de pollution ayant de multiples origines plus ou moins bien définies.

Source non scellée : Source de radioéléments dont le mode de conditionnement est tel que l'on ne peut prévenir la dispersion des radioéléments dans l'environnement dans des conditions normales d'emploi.

Elément conservatif : Expression des radioécologistes pour désigner un élément n'ayant pas, ou pratiquement pas, d'affinités avec les constituants du milieu (ex : ^{125}Sb)

BIBLIOGRAPHIE

- Amiard-Triquet, C. et Amiard, J.C., 1980. *Radioécologie des milieux aquatiques.* Edition Masson, 174p..
- Ancellin, J. et Fraizier, A. 1974. «*La radioactivité en Baie de Seine».* Extrait de *Données générales sur le littoral de la Baie de Seine.* Centre d'Expression Thématique et d'Expérimentation sur l'Environnement du Site Marin de la Baie de Seine (C.E.T.E.E.M.), Ed : La Documentation Française.
- Ancellin, J., Guéguéniat, P. et Germain, P. 1979. *Radioécologie marine. Etude du devenir des radionucléides rejetés en milieu marin et applications à la radioprotection.* Edition Eyrolles. p. 256
- Auffret, J.P., Germain P., Guéguéniat, P. et Lemosquet, Y. 1971. *Etude expérimentale de la fixation du césium 137 par certains sédiments de la Manche.* Cahiers Océanographiques, XXIII, pp. 935-955.
- Auffret, J.P., Guéguéniat, P., Lepy, M.C., Patty, J.P. et Saur, H. 1985. *Les radionucléides émetteurs gamma dans les sédiments de l'estuaire de l'orne pendant les années 1977-1983.* Actes de colloques de l'IFREMER, n°4, pp. 273-282.
- Bailly du Bois, P., Guéguéniat, P. et Cabioch, L., *Cartographie des masses d'eaux de la mer du Nord à l'aide de radiotraceurs.* Clefs CEA, n°30, 1995, pp. 34-47.

- Bailly du Bois, P., Rozet, M., Thoral, K. et Salomon, J.C. 1997. *Improving knowledge of water-mass circulation in the English Channel using radioactive tracers.* Radioprotection, volume 32,C2, pp. 63-69.
- Barbey, G. 1996. *Evolution de la radioactivité artificielle gamma dans des sédiments littoraux de la Manche.* Mémoire de D.E.S.S., Université de Caen et de Rouen.
- Baudin, J.P., Lambrechts, A. et Pally, M. 1991. *Utilisation des mousses aquatiques comme bioindicateurs de contamination radioactive. Hydroécol. Appl.*, tome 3, volume 2, pp. 209-240.
- Boust, D. 1981. *Les métaux-traces dans l'estuaire de la Seine et ses abords.* Thèse de troisième cycle, Université de Caen.
- Boust, D. 1996. *Etude de la pénétration des particules marines dans l'estuaire de la Seine par l'analyse des radionucléides naturels et artificiels.* Rapport 1997. Programme scientifique Seine aval. pp. 158-168.
- Boust, D., 1998. *Dispersion des radionucléides d'origine artificielle dans les sédiments de la Manche*. Rapport d'activité 1997, IPSN/DPRE. pp. 26-27.
- CSPI, 1989. Contrôles de l'environnement de La Hague - année 1989 -. 99p.

- Dupont, J.P., Lafite, R., Huault, M.F., Dupeuble, P.A., Brylinski, J.M., Guéguéniat, P., Lamboy, M. et Cabioch, L. 1990. *La dynamique des masses d'eaux et des matières en suspension en Manche orientale*. Actes du colloque international sur l'environnement des mers épicontinentales, Lille, 20-22 mars 1990, Océanologica Acta, numéro spécial 11, pp. 177-186.

- E.D.F. 1996. *Rapport d'activité environnement.*

- Gandon, R., Baron, Y., Fraizier, A., Boust, D., Germain, P., Guéguéniat, P. 1994. *Incidence des procédés d'épuration appliqués aux effluents industriels sur le comportement chimique du ^{106}Ru. Cas des rejets de l'usine de retraitement des combustibles irradiés de La Hague.* Radioprotection, volume 29,n°3, pp. 339-361.

- Germain, P., Miramand, P., Camus, H. et Grenaut, C. 1983. *Distribution et comportement de radionucléides transuraniens dans les compartiments physique et biologique du littoral français et de la Manche.* I.P.S.N.. Rapport CEA-R-5233, Saclay.

- Germain, P., Masson, M. et Baron, Y. 1990. *Contribution aux recherches sur les mouvements des éléments à l'état de traces dans les eaux côtières de la Manche par l'étude de la distribution spatiale de traceurs radioactifs industriels dans les moules et fucus.* I.P.S.N.. Rapport CEA-R-5534, Saclay.

- Guéguéniat, P., Baron, Y., Auffret, J.P. 1976. *Note sur l'évolution de la radioactivité artificielle dans les sédiments de la Manche pendant les années 1971-1975.* Rapport CEA-R-4739, Saclay.

- Guéguéniat *et al*, *Radionucléides artificiels et océanographie physique*. Clefs CEA, n°8, 1988, pp. 2-8.

- Guéguéniat, P., Gandon, R., Baron, Y., Salomon, J.C., Pentreah, J., Brylinski, J.M. et Cabioch, L. 1988. *Utilisation de radionucléides artificiels (^{125}Sb-^{137}Cs-^{134}Cs) pour l'observation (1983-1986) des déplacements de masses d'eau en Manche*. Radionuclides : a tool for oceanography. Edition Elseiver. pp. 260-270.

- Guéguéniat, P., Germain, P. et Charmasson, S., 1992. *Radioécologie marine*. RGN, 3 : 128-132.

- Guéguéniat, P., Bailly du Bois, P., Salomon, J.C., et Cabioch ,L., 1994. *Fluxmanche radiotracers measurements : a contribution to the dynamics of the English Chanel and North Sea*. J.Mar. Syst., 6 : 483-494.

- Guéguéniat, P., Germain, P. et Métivier, H., 1996. *Radionuclides in the oceans. Inputs and Inventories*. Les éditions de physique, 231p..

- IPSN, colloque RADOC, octobre 1996. *Etat de la radioactivité artificielle dans les océans*. Dossier de presse. 31p..

- Masson, M., 1997. *Bilan radioécologique décennal du C.N.P.E. de Paluel : 1995.* IPSN/DPRE/SERE/LERFA, Document SERE 97/001 (P),143p. et annexes.
- Masson, M., 1997. *Bilan radioécologique décennal du C.N.P.E. de Flamanville : 1996*. IPSN/DPRE/SERE/LERFA, Document SERE 97/016 (P),166p. et annexes.
- Salomon, J.C. et Breton, M. 1990. *Courants de marée et courants résiduels dans la Manche.* Actes du colloque international sur l'environnement des mers épicontinentales, Lille, 20-22 mars 1990, Océanologica Acta, numéro spécial 11, pp. 47-53.
- Vray, F., Clavel, B., Masson, M., Maro, D., Gontier, G., 1998. *Suivi radioécologique de l'environnement terrestre, aquatique continental et marin des centrales nucléaires françaises - année 1997 -.* IPSN, Document SERE 98/012 (P), 776p.