

# Le tritium dans le milieu aquatique et le risque associé

V. TORT\*, C. LEFAURE\*  
G. LINDEN\*\*, J. HERBELET\*\*

(Reçu le 22 avril 1997, révisé le 7 juin 1997, accepté le 28 septembre 1997)

## RÉSUMÉ

Le tritium est présent naturellement dans l'environnement sous forme d'eau tritiée et participe au cycle normal de l'eau. Aujourd'hui, les installations nucléaires constituent la principale source de tritium associée aux activités humaines et la production civile de tritium est estimée à environ  $2 \times 10^4$  TBq/an, soit approximativement un tiers de la production naturelle. Compte tenu de l'aspect localisé des rejets, on observe autour de ces installations des teneurs en tritium plus élevées que la concentration naturelle (comprise entre 0,1 et 0,9 Bq/l pour les eaux de surface). Les mesures effectuées en France, montrent des teneurs en tritium généralement inférieures à 10 Bq/l dans les eaux souterraines et inférieures à 20 Bq/l pour les fleuves, bien que certaines nappes phréatiques et quelques fleuves présentent localement une concentration de quelques dizaines, voire plus rarement quelques centaines de Bq/l à certaines périodes. Dans l'ensemble, les mesures réalisées en France apparaissent tout à fait cohérentes avec celles disponibles pour les autres cours d'eau européens. En ce qui concerne les impacts associés au tritium dans les eaux, en considérant un individu dont tous les apports en eau proviendraient d'une source présentant une concentration de 100 Bq/l, valeur dans l'ensemble cohérente avec les teneurs maximales relevées dans les eaux potables, la dose individuelle annuelle correspondante serait de l'ordre du millième de l'irradiation naturelle.

## ABSTRACT

Tritium in the aquatic environment and the associated risk. Tritium, which is naturally present in the environment under tritiated water form, participates to the global water cycle. Today, nuclear fuel cycle facilities represent the main source of man-made tritium. The civilian production is estimated to be about  $2 \times 10^4$  TBq/y, corresponding to a third of the natural production. Due to the fact that tritium releases are very local, concentrations in water higher than natural background (of 0.1 to 0.9 Bq/l for surface waters) are observed around these sites. Measurements in French aquatic environment reveal tritium concentration generally below 10 Bq/l for underground waters and below 20 Bq/l for rivers. Nevertheless, some ground waters and some rivers presents locally a concentration up to a few hundreds of Bq/l. Moreover, measurements performed in France are generally coherent with monitoring in other European countries. Furthermore, the associated radiological impact for a potential individual taking all his water needs from a 100 Bq/l tritiated water source, was evaluated to about one thousandth of the natural background.

\* Centre d'étude sur l'Évaluation de la Protection dans le domaine Nucléaire (CEPN), BP 48, 92263 Fontenay-aux-Roses Cedex, France.

\*\* Office de Protection contre les Rayonnements Ionisants (OPRI), BP 35, 78110 Le Vésinet, France.

## 1. Introduction

De tous les radionucléides rejetés dans l'environnement par les installations nucléaires, le tritium compte parmi ceux dont l'activité relâchée est la plus importante, notamment au niveau des effluents liquides. Ainsi, les teneurs en tritium sont localement suffisamment élevées pour être mesurables dans le milieu aquatique autour de ces installations (eaux souterraines, cours d'eau).

Depuis de nombreuses années, des équipes de chercheurs se sont intéressés au comportement du tritium dans l'environnement, à son transfert vers l'homme et à ses impacts sanitaires potentiels (Belot *et al.*, 1996). Parallèlement à ces recherches et afin d'alimenter les nombreux débats suscités par la présence de tritium dans l'environnement, il était nécessaire d'établir un bilan des teneurs en tritium du milieu aquatique. Dans cet optique, cet article présente successivement les principales données relatives aux rejets de tritium en France, puis les concentrations relevées ces dernières années dans les eaux souterraines et les cours d'eau français et européens. Enfin, sur cette base, une estimation conservatrice des impacts radiologiques potentiels est également proposée.

## 2. Production de tritium et rejets dans l'environnement

Le tritium,  $^3\text{H}$ , est un isotope radioactif de l'hydrogène qui décroît par désintégration  $\beta^-$  avec une période de 12,3 années. La désintégration d'un atome de tritium donne un atome stable d'hélium  $^3\text{He}$ . De tous les émetteurs  $\beta^-$ , le tritium est celui dont les énergies des électrons émis lors de la désintégration sont les plus faibles : énergie moyenne de 5,7 keV et énergie maximum de 18,6 keV (parcours moyen dans les tissus : 0,6  $\mu\text{m}$  ; parcours maximum : 6  $\mu\text{m}$ ). À titre de comparaison, l'isotope radioactif du potassium,  $^{40}\text{K}$ , émet des électrons dont l'énergie maximum est de 1,3 MeV. Les très faibles énergies du tritium correspondent à des transferts d'énergie linéique (TEL) compris entre celui des rayonnements  $\alpha$  et celui des rayonnements  $\gamma$ .

Le tritium présent naturellement provient des réactions nucléaires entre les rayonnements cosmiques et les atomes d'oxygène et d'azote des couches supérieures de l'atmosphère. Ainsi, la réserve mondiale de tritium naturel a été évaluée à  $1,3 \times 10^6$  TBq (équivalant à une production annuelle de  $7 \times 10^4$  TBq) dont 99% se trouve sous forme d'eau tritiée et participe au cycle normal de l'eau (UNSCEAR, 1982). Les estimations de la concentration naturelle dans les eaux de surface sont comprises entre 0,1 et 0,9 Bq/l (UNSCEAR, 1993).

À cette source s'ajoute le tritium produit par les essais nucléaires atmosphériques des années 1950 à 1960, lesquels ont augmenté temporairement la quantité de tritium sur l'ensemble de la planète d'un facteur 200 environ. Suite au moratoire des essais, cette source de tritium décroît avec le temps et les ins-

tallations du cycle nucléaire constituent aujourd'hui les sources principales de tritium anthropogénique. Dans les centrales nucléaires, le tritium est produit par des réactions différentes selon le type de réacteur : d'une part, par fission ternaire dans les éléments combustibles, d'autre part, par des réactions d'activation du bore dissous dans l'eau de refroidissement des réacteurs à eau pressurisée (REP) ou du bore des barres de contrôle dans les réacteurs à eau bouillante (REB), ou du lithium présent dans le graphite des réacteurs uranium naturel graphite gaz (UNGG) ou encore par activation du deutérium dans les réacteurs à eau lourde. Dans toutes les filières, à l'exception des réacteurs UNGG et à eau lourde, la majeure partie du tritium se forme dans les éléments combustibles. Ce tritium ne diffuse que très peu à travers les gaines, de l'ordre de 1 % passe dans le circuit de refroidissement et se retrouve dans les effluents, le reste est rejeté lors du retraitement, essentiellement sous forme liquide (UNSCEAR, 1982).

Si le tritium est un produit inévitable du fonctionnement des centrales nucléaires, les quantités de tritium produites ainsi que le rapport entre les fractions émises dans l'air et sous forme liquide varient considérablement d'une filière à une autre. La production civile actuelle de tritium s'élève à  $2 \times 10^4$  TBq/an environ, soit un tiers de la production naturelle de tritium. Les Tableaux I et II présentent les principales données sur les rejets réels et les autorisations de rejets de tritium dans l'environnement en France. Il convient de noter qu'aux autorisations annuelles de rejets s'ajoutent des limites réglementaires d'activités volumiques moyennes quotidiennes ajoutées de 80 Bq/l pour les centrales fluviales et comprises entre 20 et 100 Bq/l pour les autres installations nucléaires situées sur des cours d'eau.

TABLEAU I

**Principales données sur les rejets annuels de tritium dans l'environnement en France.**

Source de tritium	Liquide	Gazeux
Centrales nucléaires		
moyenne par site (1995)	37 TBq/an	~ 2 TBq/an*
moyenne par réacteur 900 MWe (1995)	9,1 TBq/an	~ 0,7 TBq/an*
moyenne par réacteur 1300 MWe (1995)	15,7 TBq/an	~ 0,7 TBq/an*
Retraitement		
- La Hague (1995)	9600 TBq/an	85 TBq/an
Autres		
- Marcoule (1995)	258 TBq/an	470 TBq/an
- Saclay (1995)	0,2 TBq/an	90 TBq/an
- Valduc (1995)	-	800 TBq/an
- Bruyères-le-Chatel (1995)	-	400 TBq/an

\* 10% de la catégorie « gaz ».

TABLEAU II  
Autorisations de rejets annuels de tritium.

	Liquide	Gazeux
Centrales nucléaires		total gaz (tritium + gaz rares)
par réacteur 900 MWe	27,5 TBq/an	575 TBq/an
par réacteur 1300 MWe	40 TBq/an	825 TBq/an
Retraitement		
- La Hague	37 000 TBq/an	2200 TBq/an
Autres		
- Marcoule	2500 TBq/an	10 000 TBq/an
- Saclay	7,4 TBq/an	555 TBq/an
- Valduc	-	1850 TBq/an
- Bruyères-le-Chatel	75 GBq/an	1850 TBq/an

Les rejets de tritium par l'industrie non nucléaire et par les hôpitaux ne sont pas disponibles. Ils ne représentent, selon le rapport des Nations Unies (UNSCEAR, 1982), qu'une très faible fraction du tritium anthropogénique produit à l'échelle mondiale.

### 3. Comparaison des teneurs en tritium des eaux en Europe

L'objectif de cette partie de l'article est de présenter les teneurs en tritium (activité par unité de volume) dans les nappes phréatiques et les cours des principaux fleuves dont l'eau peut être utilisée comme eau de boisson en France ainsi que dans quelques pays européens disposant d'installations nucléaires (Belgique, Suisse, Allemagne et Grande-Bretagne).

En 1994, la Commission des Communautés Européennes (DGXII) a publié un rapport présentant un résumé des données disponibles relatives aux niveaux de radioactivité des États membres de l'Union Européenne pour la période 1987-1990 (CCE, 1994). Les données sont présentées pour différentes catégories d'échantillonnage, parmi lesquelles l'eau potable, les eaux de surface et le lait. Les radionucléides étudiés pour l'eau potable sont : le tritium, le strontium 90 et le césium 137. Dans l'ensemble, ce rapport fournit peu d'informations utiles compte tenu de niveaux de notification élevés : 100 Bq/l pour les eaux potables comme pour le lait. Très rares sont les valeurs dépassant ce niveau de notification. De plus, les mesures réalisées en des points proches d'installations nucléaires et qui pourraient dépasser le seuil de notification sont considérées comme non représentatives du niveau national et ne sont pas communiquées.

Les données présentées ci-après sont obtenues avec des méthodes de prélèvement qui varient d'un pays à l'autre, mais les teneurs en tritium sont dans l'ensemble mesurées à l'aide de la même technique, la scintillation liquide. Les seuils de détection sont eux aussi variables et dépendent fortement du temps de comptage considéré, du bruit de fond, de la prise d'essai (qualité de l'échantillon) et du rendement de comptage de l'appareil. Cependant, plus le seuil est bas, plus les incertitudes de mesure sont élevées.

### **3.1. France**

L'Office de Protection contre les Rayonnements Ionisants (OPRI) effectue chaque année de nombreuses mesures de radioactivité dans les fleuves et nappes phréatiques françaises. Les exploitants nucléaires (EDF, Cogema, CEA) ou d'autres organismes tels que l'Institut de Protection et de Sécurité Nucléaire (IPSN), le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), la Commission de Recherche et d'Information Indépendante sur la Radioactivité (CRII-RAD)... procèdent également à des mesures de différents radionucléides dont le tritium. Parce que les mesures de l'OPRI couvrent l'ensemble du territoire, ce sont plus spécialement ces résultats pour les principaux cours d'eau français ainsi que pour 120 points d'eau d'alimentation qui sont présentés dans les sections suivantes (OPRI, 1995 et 1996). Ils sont cependant mis en parallèle avec des mesures similaires effectuées par les autres organismes quand celles-ci sont disponibles.

#### **3.1.1. Fleuves**

Les résultats des mesures de l'OPRI pour les principaux cours d'eau français et pour les années 1993 à 1996 sont présentés dans les Tableaux III à VI. Il s'agit de mesures effectuées sur des mélanges mensuels d'eau prélevée en continu par des hydrocollecteurs. Dans de nombreux cas, les échantillons prélevés sont en dessous du seuil de détection (de l'ordre de 9 à 10 Bq/l selon les cas), dans d'autres cas, seules des traces de tritium sont détectées (de 10 à 20 Bq/l). Les incertitudes des mesures varient de 3 à 15 %.

Les cours d'eau et les points de mesure présentés sont les suivants :

- Durance : en aval du centre d'étude nucléaire de Cadarache
- Meuse : en aval de la centrale nucléaire de Chooz
- Moselle : en aval de la centrale nucléaire de Cattenom
- Garonne : en aval de la centrale nucléaire de Golfech et à environ 150 km en aval de celle-ci à Ambès
- Dordogne : à La Chapelle d'Ambès (mesure du bruit de fond)

TABLEAU III

Activité en tritium mesurées par l'OPRI  
dans les principaux cours d'eau français en 1993 (Bq/l).

Fleuve	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
<b>Seine</b>												
Nogent	20	T	34	43	51	48	25	43	58	T	T	T
Le Vésinet	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	A
Rouen	A	T	A	T	T	T	T	T	T	T	A	A
<b>Loire</b>												
Belleville	A	T	T	T	T	A	T	T	T	T	T	T
St-Laurent	55	46	71	71	51	47	59	67	61	28	35	31
Angers	T	T	23	19	20	T	19	32	24	T	T	T
<b>Rhône</b>												
Génissiat	A	T	T	T	A	A	A	T	T	A	A	A
St-Alban	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	A
Vallabrègues	T	20	31	27	19	18	T	T	T	T	T	19
<b>Garonne</b>												
Golfech	A	A	T	A	T	A	A	T	A	A	A	A
Ambès	A	A	A	A	T	A	A	A	A	A	A	A
<b>Dordogne</b>												
Chap. d'Ambès	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
<b>Meuse</b>												
Chooz	A	A	A	A	T	T	A	T	A	T	A	A
<b>Moselle</b>												
Cattenom	23	41	25	T	24	48	50	48	43	20	23	T
<b>Durance</b>												
Cadarache	A	A	A	A	A	A	T	A	A	A	A	A
<b>Rhin</b>												
Kembs (Gd canal d'Alsace)	A	A	T	T	T	T	A	T	T	A	A	T
Vogelgrun (Gd canal d'Alsace)	A	T	T	T	T	T	A	T	T	A	A	T
Seltz	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	A	A
<b>Doubs</b>												
Villiers-le-Lac				A	A	A	A	T	A	A	A	A
Goumois				71	130	43	40	35	37	25	200	140

A = &lt; seuil de détection situé aux environs de 10 Bq/l

T = ~ de 10 à 20 Bq/l

TABLEAU IV

Activité en tritium mesurées par l'OPRI  
dans les principaux cours d'eau français en 1994 (Bq/l).

Fleuve	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
<b>Seine</b>												
Nogent	T	T	19	T	T	35	T	T	T	24	42	T
Le Vésinet	A	A	T	T	A	T	A	T	A	T	T	T
Rouen	A	A	A	A	A	T	T	A	A	T	A	A
<b>Loire</b>												
Belleville	A	A	A	T	T	T	T	T	T	T	A	A
St-Laurent	T	T	T	T	T	34	65	41	29	35	T	32
Angers	A	A	T	T	T	T	17	17	T	T	A	A
<b>Rhône</b>												
Génissiat	A	A	A	T	A	A	A	A	A	A	A	A
St-Alban	A	T	A	T	T	A	A	T	T	A	T	T
Vallabrègues	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
<b>Garonne</b>												
Golfech	A	A	A	A	A	A	A	21	A	A	A	A
Ambès	A	A	A	A	A	A	A	T	T	A	A	A
<b>Dordogne</b>												
Chap. d'Ambès	A	A	A	A	A	A	A	T	A	A	A	A
<b>Meuse</b>												
Chooz	A	A	A	A	A	A	T	A	A	A	A	A
<b>Moselle</b>												
Cattenom	T	T	25	T	27	T	T	T	T	T	19	25
<b>Durance</b>												
Cadarache	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
<b>Rhin</b>												
Kembs (Gd canal d'Alsace)	A	T	A	T	A	A	A	A	A	A	A	T
Vogelgrun (Gd canal d'Alsace)	A	T	A	T	A	A	A	T	A	A	A	T
Seltz	A	T	T	T	T	A	T	A	A	A	A	A
<b>Doubs</b>												
Villiers-le-Lac			A	A	A	A	A	T	A	A	A	A
Goumois			24	120	47	23	280	46	26	T	T	21

A = < seuil de détection situé aux environs de 10 Bq/l

T = ~ de 10 à 20 Bq/l

TABLEAU V

Activité en tritium mesurées par l'OPRI  
dans les principaux cours d'eau français en 1995 (Bq/l).

Fluve	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
<b>Seine</b>												
Nogent	< 20	< 9,7	20	21	< 10	31	< 9,5	190	< 20	< 20	21	< 27
Le Vésinet	< 10	< 10	< 10	< 9,7	< 9,8	< 20	< 9,8	< 9,7	< 9,9	< 11	< 10	< 11
Rouen	< 9,6	< 9,8	< 9,9	< 9,7	< 9,9	< 9,8	< 9,9	< 9,9	< 11	< 11		
<b>Loire</b>												
Belleville	< 20	< 9,8	< 9,9	< 10	< 20	< 10	< 20	< 20	< 10	< 9,8	< 9,7	< 9,9
St-Laurent	< 10	24	< 20	< 20	22	41	53	55	21	23-	38	28
Angers	< 20	< 10	< 10	< 10	< 9,9	< 20	< 20	22	< 20	< 10	< 9,6	< 20
<b>Rhône</b>												
Génissiat	< 9,3	< 9,2	< 9,8	< 9,6	< 9,7	< 9,8	< 9,8	< 9,5	< 9,2	< 11	< 11	< 9,8
St-Alban	< 9,6	< 9,5	< 9,5	< 9,8	< 9,8	< 9,8	< 9,8	< 20	< 20	< 9,8	< 9,8	< 9,7
Vallabrègues	< 9,5	< 20	< 9,7	< 10	< 9,9	< 20	< 20	< 20	< 9,7	< 20	< 9,6	< 20
<b>Garonne</b>												
Golfech	< 9,7	< 9,8	< 8,9	< 9,7	< 9,6	< 10	< 9,7	< 20	< 9,9	< 11	< 9,9	< 10
Ambès	< 9,8	< 9,9	< 10	< 10	< 9,6	< 10	< 9,9	< 9,7	< 9,8	< 10	< 10	< 10
<b>Dordogne</b>												
Chap. d'Ambès	< 10	< 10	< 9,9	< 10	< 9,6	< 10	< 9,8	< 9,7	< 10	< 10	< 9,8	< 10
<b>Meuse</b>												
Chooz	< 10	< 9,9	< 9,9	< 9,8	< 9,7	< 9,8	< 9,8	< 9,7	< 11	< 9,9	< 11	< 11
<b>Moselle</b>												
Cattenom	33	< 20	< 8,9	20	14	18	16	31	33	39	44	14
<b>Durance</b>												
Cadarache	< 10	< 9,6	< 8,7	< 9,8	< 9,7	< 10	< 9,6	< 9,5	< 9,7	< 9,8	< 9,4	< 9,9
<b>Rhin</b>												
Kembs												
(Gd canal d'Alsace)	< 9,9	< 9,9	< 9,7	< 9,9	7,1	< 9,0	< 9,0	< 9,0	< 9,0	< 9,0	< 9,0	< 9,0
Vogelgrun												
(Gd canal d'Alsace)	< 9,5	< 10	< 9,8	< 10	< 9,5	< 9,8	< 9,5	< 9,6	< 9,8	< 9,9	< 11	< 11
Seltz	< 9,5	< 9,6	< 10	< 9,6	< 9,0	< 9,0	< 9,9	< 9,0		< 9,0	< 9,0	< 9,0
<b>Doubs</b>												
Villiers-le-Lac		< 9,4		< 9,8	< 10	< 10	< 9,7	< 9,9	< 9,7	< 11	< 9,7	
Goumois		< 20		< 20	< 20	< 20	34	48	19	79	< 20	

N.B. : depuis 1995, la notation A et T est remplacée par la publication des seuils techniques.



LE TRITIUM DANS LE MILIEU AQUATIQUE ET LE RISQUE ASSOCIÉ

TABLEAU VI

Activité en tritium mesurées par l'OPRI  
dans les principaux cours d'eau français en 1996 (Bq/l).

Fluve	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
<b>Seine</b>												
Nogent	< 9,7	<40	< 9,6	47	62	66	41	44	30	17	26	18
Le Vésinet	< 10	< 9,7	< 11	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 10
<b>Loire</b>												
Belleville	< 9,6	< 11	< 9,2	< 20	< 10	< 20	< 20	< 11	< 20	< 20	< 12	< 9,4
St-Laurent	< 10	< 20	< 20	36	22	31	53	68	71	66	47	< 20
Angers	< 10	< 9,8	< 9,7	< 11	< 20	< 20	19	25	33	31	< 20	< 10
<b>Rhône</b>												
Génissiat	< 10	< 9,6	< 9,6	< 9,6	< 11	< 11	< 9,4	< 9,9	< 10	< 11	< 10	< 11
St-Alban	< 10	< 9,8	< 20	< 20	< 20	< 9,4	< 20	< 20	< 20	< 20	< 10	< 10
Vallabrègues	< 9,8	< 20	< 11	24	22	19	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20
<b>Garonne</b>												
Golfech	< 9,8	< 9,7	< 9,7	< 10	< 9,3	< 9,8	< 9,4	< 20	< 11	< 20	< 10	< 9,3
Ambès	< 10	< 11	< 11	< 10	< 9,7	< 10	< 11	< 9,8	< 9,6	< 10	< 10	< 10
<b>Dordogne</b>												
Chap. d'Ambès	< 10	< 11	< 11	< 10	< 9,8	< 11	< 11	< 9,9	< 9,6	< 12	< 10	< 11
<b>Meuse</b>												
Chooz	< 9,9	< 9,6	< 11	< 10	< 9,2	< 11	< 9,9	< 11	< 10	< 10	< 10	< 10
<b>Moselle</b>												
Cattenom	34	42	30	24	26	32	30	28	28	37	20	21
<b>Durance</b>												
Cadarache	< 11	< 9,9	< 9,7	< 9,6	< 9,4	< 9,7	< 10	< 11	< 10	< 11	< 10	< 9,9
<b>Rhin</b>												
Kembs (Gd canal d'Alsace)	< 9,0	< 9,0	< 9,0	< 9,0	< 9,0	< 9,0	< 9,0	< 9,0	< 9,0	< 9,0	< 9,0	< 9,0
Vogelgrun (Gd canal d'Alsace)	< 9,8	< 9,7	< 9,6	< 11	< 11	< 11	< 9,9	< 10	< 9,9	< 11	< 12	< 10
Seltz	< 9,0	< 9,0	< 9,0	< 9,0	< 9,0	< 9,0	< 9,0	< 9,0	< 9,0	< 9,0	< 9,0	< 9,0
<b>Doubs</b>												
Villiers-le-Lac	< 9,7		< 11	< 9,6	< 11	< 10	< 10	< 11	< 9,3	< 10	< 12	< 10
Goumois	< 20	57	29	29	18	< 11	40	77	24	130	130	

N.B. : depuis 1995, la notation A et T est remplacée par la publication des seuils techniques.

- Rhône : à Genissiat, en aval de la centrale nucléaire de St-Alban et à Valabrègues en Camargue en aval de toutes les installations nucléaires situées sur le Rhône
- Loire : en aval des centrales nucléaires de Belleville, de St-Laurent et à Angers en aval de toutes les installations nucléaires situées sur la Loire
- Seine : en aval de la centrale nucléaire de Nogent s/Seine, au Vesinet et à Rouen
- Rhin : à Kembs sur le grand canal d'Alsace en amont de la centrale nucléaire de Fessenheim, à Vogelgrun (également sur le grand canal d'Alsace) à environ 20 km en aval de Fessenheim et à Seltz à environ 100 km en aval de Fessenheim
- Doubs : à Villiers-le-Lac (France), en amont de la Chaux-de-Fonds (Suisse) et à Goumois (frontière franco-suisse) en aval de la Chaux-de-Fonds.

Les débits des fleuves concernés représentent un paramètre important pouvant expliquer les fortes variations de concentration d'un fleuve à l'autre. En effet, selon les caractéristiques physiques des fleuves, la dilution peut s'effectuer plus ou moins rapidement. Par exemple, la Loire étant un fleuve relativement inhomogène, non canalisé, les mélanges se font par endroit de manière irrégulière et les teneurs en tritium mesurées sont, dans l'ensemble, supérieures au seuil de détection et peuvent atteindre plus de 70 Bq/l en moyenne mensuelle à certaines périodes de l'année et en certains points. Il en est de même pour la Seine dont le débit est faible et où l'on a mesuré certains mois de 1996 des concentrations supérieures à 60 Bq/l en aval de la centrale nucléaire de Nogent. Par contre, pour le Rhône, qui est régulier, canalisé et a un fort débit, on ne relève le plus souvent que des traces de tritium, et certains mois des teneurs qui ne dépassent pas 30 Bq/l, malgré les nombreuses installations nucléaires qui y déversent du tritium, puisque ce fleuve est un des premiers au monde pour la densité des installations électronucléaires. Il est également important de signaler que les autorisations de rejets des installations dépendent du débit du fleuve.

Dans l'ensemble, on peut remarquer que les teneurs mesurées varient fortement d'un mois à l'autre, les rejets de tritium dans l'eau n'étant pas réguliers. Il est difficile d'établir une moyenne annuelle pour chaque point de mesure, à l'exception des lieux où les concentrations mesurées sont significatives. C'est le cas en 1993 par exemple pour la Seine à Nogent avec une teneur moyenne de 32 Bq/l, la Loire à St-Laurent avec 52 Bq/l, la Moselle à Cattenom avec 31 Bq/l et le Doubs à Goumois avec 80 Bq/l. Le cas du Doubs est assez spécial puisque cette rivière qui prend sa source en France passe par la Suisse avant de revenir en France. En Suisse, ses eaux se chargent de tritium à son passage à la Chaux-de-Fonds où est implantée l'industrie horlogère suisse (voir Sect. 3.2).

Les résultats des mesures effectuées par les exploitants nucléaires sont disponibles sur Minitel 3615 code Magnuc. En ce qui concerne les installations de la Cogema, des mesures du tritium sont effectuées en amont et en aval de Marcoule sur le Rhône, montrant dans les deux cas des concentrations moyennes inférieures à 24 Bq/l sur une année. Pour les sites EDF, *l'activité volumique après dilution dans les eaux réceptrices* (terme utilisé sur Magnuc pour désigner les teneurs en tritium de l'eau relevées sur les sites EDF) varie fortement d'un site à l'autre, mais en général, on retrouve les ordres de grandeur des mesures de l'OPRI. Les moyennes annuelles pour la plupart des sites sont de l'ordre de quelques Bq/l. On peut également citer ici les mesures réalisées par l'OPRI dans les ruisseaux autour du centre de la Hague (usine de retraitement de la Cogema et centre de stockage des déchets de l'ANDRA), bien que ceux-ci ne soient pas utilisés comme source d'eau de boisson. Le tritium mesuré provient du déversement des eaux de ruissellement des installations nucléaires dans ces ruisseaux. La concentration en tritium mesurée dans le ruisseau des Moulinets a atteint 38 Bq/l pour certains échantillons prélevés en 1994. La teneur en tritium du ruisseau de Ste Hélène varie quant à elle de 60 à 320 Bq/l pour l'année 1993 et de 100 à 460 Bq/l pour l'année 1994.

### 3.1.2. Eaux souterraines

De janvier 1994 à juin 1995, l'OPRI a effectué plus d'une centaine de mesures du tritium dans les eaux souterraines d'alimentation en France. Il s'agit de mesures ponctuelles (et non pas continues comme pour les fleuves) effectuées dans les eaux souterraines (source ou forage) préalablement à des raccordements au circuit d'eau de consommation. Il est important de préciser ici que ces mesures ne sont pas forcément représentatives de la teneur en tritium de l'ensemble des eaux souterraines en France puisqu'aussi bien les points contrôlés que le nombre des mesures ne visent pas à obtenir une cartographie représentative de la contamination des eaux. Pendant la période considérée, les prélèvements ont eu lieu principalement dans les départements suivants : Ardèche, Charente, Cher, Drome, Gard, Hérault, Moselle, Seine-Maritime, Seine-et-Marne et Vaucluse. Sur les 120 points mesurés, 113 échantillons ont une activité en tritium inférieure à la limite de détection, comprise entre 8,2 et 9,6 Bq/l dans les eaux analysées. Les 7 autres échantillons présentent des traces de tritium avec une activité inférieure à 20 Bq/l de tritium. Il s'agit notamment d'eau de nappes alluviales en relation avec le Rhône (cas des forages des Angles et St-Alexandre dans le Gard et de celui d'Avignon dans le Vaucluse) ou avec la Seine (cas de Noyent-sur-Seine en Seine-et-Marne situé en aval de la centrale nucléaire de Nogent-sur-Seine). De plus, une campagne de 32 mesures ciblée sur le site de Valduc menée en 1996 révèle des concentrations pouvant atteindre quelques dizaines de Bq/l (en 15 points), voire exceptionnellement supérieures à 100 Bq/l (en 2 points).

Par ailleurs, les prélèvements effectués dans des nappes phréatiques proches d'installations nucléaires montrent des concentrations en tritium plus élevées que pour les eaux souterraines d'alimentation : les concentrations peuvent

atteindre quelques centaines de Bq (cas des eaux souterraines de Codolet ou encore de certains sites du CEA). Les mesures faites par l'OPRI dans l'ancien puits d'alimentation de Codolet près de Marcoule font apparaître une activité comprise entre 90 et 160 Bq/l. À titre de comparaison les mesures effectuées par la CRII-RAD en 1993 (CRII-RAD, 1994) dans les nappes phréatiques autour de Marcoule font état de teneurs en tritium de l'ordre de 300 Bq/l à la station d'Herboux et de 95 Bq/l à Codolet. La teneur en tritium de l'eau utilisée par le centre de Valduc (CEA) contrôlée par l'OPRI est également de l'ordre de 100 Bq/l. Les mesures réalisées par l'OPRI à Saclay montrent une teneur en tritium de 250 Bq/l (moyenne 1993 à 96) dans la nappe phréatique située en dessous du centre du CEA (eau non utilisée par le centre) et une teneur de 170 Bq/l (moyenne 1993 à 96) dans l'eau utilisée par le CEP (Centre d'Étude des Propulseurs), situé près du centre du CEA. Les valeurs les plus élevées résultent de mesures effectuées par l'ANDRA dans la nappe phréatique située sous le centre de stockage des déchets de La Manche (La Hague), puisque les valeurs citées (ANDRA, 1995) atteignent quelques 10 000 Bq/l (eau non utilisée).

En outre, chaque site EDF effectue régulièrement des mesures de radioactivité dans les eaux souterraines. Les résultats de l'année 1994 montrent des concentrations mesurées inférieures à 30-40 Bq/l en moyenne (données Magnuc).

### 3.2. Suisse

La division de la radioprotection de l'Office Fédéral de la Santé Publique suisse publie régulièrement un rapport : *Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnement en Suisse* (OFSP, 1994). Le rapport de 1993 présente notamment des mesures de concentration en tritium dans les fleuves (Rhône, Aar, Doubs).

En fait, dans les prélèvements d'eaux de rivières, le tritium reste en général le seul radionucléide artificiel détectable. Les échantillons mensuels témoignent en partie de l'influence de l'industrie des peintures luminescentes sur la teneur des eaux du Doubs et des installations nucléaires (quatre centrales nucléaires ainsi que l'Institut Paul Scherer) sur la teneur des eaux de l'Aar.

Le contrôle de la radioactivité dans l'eau autour des différentes installations du CERN est effectué en plusieurs points. Les mesures dans les rivières (eaux de surface), dans les eaux potables et les eaux souterraines montrent que la teneur en tritium est toujours inférieure à 7,7 Bq/l, ce qui est vraisemblablement le seuil de détection des appareils de mesure utilisés.

La concentration la plus élevée qui ait été mesurée est de l'ordre de 40 à 150 Bq/l en 1993 sur le Doubs à St-Ursane. Ces valeurs s'expliquent, d'une part, par les rejets de l'industrie horlogère de la Chaux-de-Fonds et, d'autre

part, par le faible débit du Doubs (de l'ordre d'une trentaine de  $m^3/s$ ) qui n'assure pas une dilution rapide des effluents. Les rejets de l'industrie horlogère se reflètent dans les valeurs mesurées par l'OPRI en France sur le Doubs à Goumois (voir Tableaux III à VI). La concentration dans le Rhône reste inférieure à 5 Bq/l. Au niveau de l'Aar, la concentration à Brienz, situé en amont des quatre installations nucléaires implantées sur l'Aar, est inférieure à 2 Bq/l.

TABLEAU VII  
Concentrations en tritium mesurées dans l'Aar (Suisse) en Bq/l.

	Brugg		Brienz
	1992	1993	1993
minimum mensuel	4,0	3,2	1,3
maximum mensuel	14,2	21,2	2,2
moyenne annuelle	6,7	7,4	1,6

Par contre, les mesures effectuées à Brugg, c'est-à-dire en aval des centrales nucléaires de Mühleberg et de Gösgen révèlent l'influence des rejets de tritium de ces installations, avec une concentration annuelle moyenne en 1993 de plus de 7 Bq/l. Le Tableau VII présente les valeurs mesurées dans l'Aar en 1992 et 1993.

### 3.3. Grande-Bretagne

En Grande-Bretagne, le HMIP (Her Majesty's Inspectorate of Pollution) publie chaque année un rapport sur les résultats du programme de surveillance des substances radioactives dans l'environnement en Angleterre et au Pays-de-Galles. Des mesures complémentaires dans les eaux de boisson sont réalisées indépendamment par le Ministère de l'Environnement et publiées chaque année.

La plupart des sites nucléaires britanniques sont situés sur les côtes. Les rejets liquides de tritium s'effectuent donc pour l'essentiel dans le milieu marin, hormis le cas de laboratoires situés sur la Tamise. Néanmoins des prélèvements sont effectués régulièrement dans les rivières et lacs situés aux environs des installations. L'eau de ces rivières et de ces lacs est souvent utilisée comme eau de boisson. Le Tableau VIII résume les principales mesures de tritium effectuées dans les rivières, points d'eau et lacs autour des sites nucléaires, et ceci pour l'année 1993 (HMIP, 1994). Dans l'ensemble, les concentrations en tritium restent inférieures à 10 Bq/l, à l'exception de la Tamise en aval du laboratoire de Harwell où les moyennes trimestrielles ont atteint la valeur de 77 Bq/l.

TABLEAU VIII

Minimum et maximum des moyennes trimestrielles des teneurs en tritium (Bq/l)  
dans les eaux autour des sites nucléaires britanniques en 1993.

	Concentration (Bq/l)
<b>Environs de Sellafield (traitement)</b>	
River Calder	4 - 21
River Calder at Bridge, River Ehen, River Mite, River Irt, River Esk, Wastwater, Ennerdale Water, Devoke Water, Thirmere	3 à 6
Seaburn Sewer Outfall	9 - 17
<b>Environs de Sizewell (centrale)</b>	
Nature Reserve	9
The Meare	4,7
Leisure Park	4,3
<b>Environs de Bradwell (centrale)</b>	
Public Supply	4,2
<b>Environs de Dungeness (centrale)</b>	
Pumping station	3,2
<b>Environs de Hinkley Point (centrale)</b>	
Durleight Reservoir	3,9
Ashford Reservoir	4,1
<b>Environs de Berkeley (centrale)</b>	
Gloucester and Sharpness Canal	3,9
<b>Environs de Oldbury (centrale)</b>	
Public Supply	4,2
<b>Environs de Heysham (centrale)</b>	
Public Supply at Lancaster	8,2 - 10,9
<b>Environs de Hartlepool (centrale)</b>	
Public Supply	2,2
<b>Environs de Trawsfynydd (centrale)</b>	
Public Supply	5,2
Lake Trawsfynydd	3,9 - 5,0
<b>Environs de Wylfa (centrale)</b>	
Public Supply	4,2
<b>Environs de Harwell (laboratoire)</b>	
Lydebank Brook	10,4 - 59,5
Tamise amont	4,1 - 7,0
Tamise aval	5,8 - 77,4
Day's Lock	3,8 - 19,8

### 3.4. Belgique

Pour la Belgique, les teneurs en tritium de la Meuse sont mesurées par L'IRE<sup>(1)</sup> En quatre points différents :

- à Hastière, en aval de la centrale nucléaire française de Chooz (actuellement arrêtée),
- à Huy, en amont de la centrale de Tihange,
- à Ampsin, en aval de Tihange, et
- à Monsin, toujours en aval de Tihange, mais à une quarantaine de kilomètres de la centrale, près de la ville de Liège.

Les valeurs relevées sont des moyennes hebdomadaires pour 1993 et 1994, c'est-à-dire que les échantillons prélevés en continu pendant une semaine sont mélangés et c'est alors la teneur en tritium du mélange qui est mesurée. La limite de sensibilité de ces mesures est de 4 Bq/l.

Dans l'ensemble, les mesures effectuées à Hastière et à Huy, c'est-à-dire en aval de Chooz, sont inférieures au seuil de détection, ceci étant dû au fait que la centrale de Chooz est actuellement arrêtée. À Hastière, on note des teneurs variant de 4,1 à 8,5 Bq/l pour seulement 9 semaines sur 52 en 1993 et de 4,3 à 13,3 Bq/l pour 14 semaines sur 52 en 1994. De même, les valeurs mesurées à Huy sont comprises entre 4 et 12 Bq/l. Il faut noter que, compte tenu du faible seuil de détection, les incertitudes de ces mesures sont élevées et varient de 3 à 4,5 Bq/l.

Les rejets dans la Meuse de la centrale de Tihange conduisent à des teneurs en tritium plus élevées. La concentration en tritium dans l'eau atteint certaines semaines 80 Bq/l en 1993 et 65 Bq/l en 1994. Malgré tout, certaines semaines, le seuil de détection n'est pas atteint. Il faut noter que la Meuse est une rivière ayant un débit particulièrement faible, de l'ordre de 150 m<sup>3</sup>/s. Les valeurs annuelles moyennes en ces points sont en 1993 de 18,8 Bq/l à Ampsin et 16,7 Bq/l à Monsin et en 1994 de 12,4 Bq/l à Ampsin et 11,5 Bq/l à Monsin.

### 3.5. Allemagne

Les Commissions Internationales pour la Protection du Rhin, de la Moselle et de la Sarre contre la Pollution effectuent chaque année de nombreux prélèvements dans les eaux de ces rivières dans les pays riverains. Les résultats des analyses physico-chimiques effectuées sur ces échantillons sont centralisés et édités chaque année (CIPMS, 1994; CIPR, 1995).

(1) Institut National des Radioéléments, Service de Métrologie Nucléaire, avenue de l'Espérance, 6220 Fleurus, Belgique.

En ce qui concerne les mesures de radioactivité, et plus particulièrement de tritium, elles sont effectuées systématiquement en quatre points sur la Moselle, en un point sur la Sarre et en trois points sur le Rhin. Certaines mesures sont effectuées en continu, d'autres font l'objet de prélèvements ponctuels (généralement mensuels). Les méthodes d'analyse varient d'un site à l'autre, ainsi que les limites de détection. Le Tableau IX présente un résumé des mesures réalisées en 1992 et 1993 sur le Rhin, la Sarre et la Moselle.

TABLEAU IX

Moyennes annuelles de la teneur en tritium de trois rivières allemandes en 1992 et 1993 (Bq/l).

	Concentration en tritium	
	1992 (Bq/l)	1993 (Bq/l)
<b>Rhin</b>		
Coblence	< 10	7,2
Bimmen	< 10	6,9
Lobith	6,4	non mesurée
<b>Moselle</b>		
Schengen (Luxembourg)	23,5	31
Palzem	27	< 34
Coblence 1	< 20	< 18
Coblence 2	11,6 C	16,3 C
<b>Sarre</b>		
Konz	< 20	< 15

C = échantillonnage continu

Les points de mesure sur la Moselle sont tous en aval de la centrale nucléaire française de Cattenom. Sur la Sarre, le point de prélèvement est situé juste avant le confluent de la Sarre et de la Moselle. Aucune installation nucléaire n'étant située sur cette dernière rivière, les mesures en ce point représentent une estimation du bruit de fond. En ce qui concerne le Rhin, les deux sites nucléaires de Jülich et de Mülheim-Kärlich se trouvent entre les deux villes de Lobith et Bimmen (près de la frontière avec les Pays-Bas) et Coblence. En amont de Coblence, plusieurs installations sont implantées sur le Rhin, ce sont les sites de Phillipsburg, de Biblis et de Karlsruhe. En outre deux affluents du Rhin, le Main et le Neckar, sur lesquels sont également implantées des installations nucléaires, se jettent dans le Rhin en amont de Coblence.

Un autre rapport allemand (Baden-Württemberg, 1993) sur les mesures de radioactivité dans les fleuves (Neckar et Rhin) montre que la concentration en tritium dans l'eau de boisson est faible et varie dans l'ensemble entre 6 et 12 Bq/l, 6 Bq/l étant le seuil de mesure. Seuls les points de prélèvement autour du centre nucléaire de Karlsruhe (KfK) donnent des valeurs plus élevées, de l'ordre de quelques dizaines de Bq/l dans le Rhin.



#### 4. Synthèse des teneurs en tritium et estimation du risque associé

Compte tenu des fortes variations des seuils de détection d'un pays à l'autre, voire dans un même pays, il est difficile d'établir une synthèse précise des données recueillies. Cependant, on peut mettre en évidence quelques ordres de grandeur.

Tout d'abord, en ce qui concerne les eaux d'alimentation souterraines, les mesures effectuées, aussi bien en France qu'en Grande-Bretagne, montrent une teneur en tritium dans l'ensemble inférieure à 10 Bq/l. Toutefois, sous l'influence des installations nucléaires (infiltrations des eaux de pluie et de surface), certaines nappes phréatiques proches présentent une concentration en tritium pouvant atteindre plusieurs dizaines de Bq/l, voire dans certains cas dépasser la centaine de Bq/l.

Parmi les cours d'eau étudiés, un seul présente des teneurs en tritium dépassant régulièrement une centaine de Bq/l : il s'agit du Doubs en Suisse et en France. En effet, de grandes quantités de tritium sont rejetées régulièrement dans cette rivière par l'industrie horlogère implantée dans la région de la Chaux-de-Fonds (Suisse).

Pour les autres cours d'eau, dans une majorité de cas, les concentrations mesurées sont inférieures à 20 Bq/l. Néanmoins, certains fleuves présentent une teneur en tritium supérieure à certaines périodes de l'année. Il s'agit principalement de mesures effectuées proches d'installations nucléaires sur des fleuves dans lesquels la dilution est lente et inhomogène. On peut citer ici la Loire en aval de St Laurent, la Seine en aval de Nogent, la Moselle en aval de Cattenom, la Tamise en aval des laboratoires de Harwell et la Meuse en aval de Tihange. Dans ces cas là, le tritium mesuré dans l'eau varie entre le seuil de détection et quelques dizaines de Bq/l, avec des pointes pouvant atteindre 70 à 80 Bq/l certaines semaines, tout en étant toujours inférieur aux limites réglementaires de rejet. Il est néanmoins important de préciser que les rejets des installations nucléaires sont modulés en fonction du débit du cours d'eau récepteur.

En ce qui concerne les risques associés au tritium, s'appuyant sur les hypothèses de durée de séjour des produits tritiés dans le corps humain, sur l'efficacité relative des rayonnements  $\beta$  émis par le tritium et sur la sensibilité relative des différents tissus, la CIPR a fourni des facteurs de conversion entre 1 becquerel de tritium incorporé et la dose équivalente engagée exprimée en sievert (Tableau X). La radiotoxicité du tritium sous forme organique n'est que 2 à 3 fois plus élevée que celle du tritium sous forme d'eau tritiée et la dose résultante est relativement faible par rapport à celle qui résulte de l'ingestion d'eau tritiée. Il convient de noter que compte tenu de la très faible énergie des  $\beta$  émis et de son temps de résidence dans le corps relativement court, le tritium est l'un des radionucléides les moins radiotoxiques.

Il convient également de rappeler que l'OMS a émis des recommandations concernant la qualité de l'eau de boisson en fixant le niveau de référence de la dose efficace engagée attribuable à l'eau de boisson à 0,1 mSv par an, soit

environ 5% de la dose efficace moyenne annuelle d'origine naturelle (OMS, 1994). En dessous de ce niveau de référence, l'eau de boisson est considérée propre à la consommation humaine et aucune mesure visant à réduire la radioactivité n'est nécessaire. Avec le facteur de conversion de la CIPR pour l'eau tritiée, le niveau de référence pour le tritium est de 7800 Bq/l. Les recommandations de l'OMS sont généralement appliquées au niveau national. Le Canada, par exemple, a récemment retenu la valeur de 7000 Bq/l pour la sixième édition de ses recommandations officielles.

TABLEAU X  
Facteur de conversion de dose pour le tritium.

	Facteur de conversion de dose (Sv/Bq)
Eau tritiée	$1,8 \times 10^{-11}$
Forme organique	$4,2 \times 10^{-11}$

En utilisant les facteurs de la CIPR pour un individu du public qui boirait toute l'année de l'eau tritiée avec une concentration de 100 Bq/l, valeur dans l'ensemble cohérente avec les teneurs maximales relevées par l'OPRI dans les eaux potables, et qui consommerait une nourriture également intégralement de provenance locale et donc contaminée de manière similaire, on obtient une dose individuelle annuelle de l'ordre de 0,002 mSv. Cette valeur est à comparer avec la dose individuelle moyenne due à l'irradiation naturelle de 2,4 mSv/an.

Au niveau des impacts sanitaires, l'hypothèse prudente de la CIPR est qu'il n'y a pas de seuil d'exposition en dessous duquel le risque est nul et que le risque d'effets pathologiques induits par l'exposition est directement proportionnel au niveau de cette exposition. La valeur actuelle du coefficient de probabilité de mortalité par cancer sur la durée de la vie, recommandé par la CIPR, est de 0,05 pour un sievert, pour des doses et des débits de dose faibles et pour l'ensemble de la population (CIPR, 1990). L'application de ce coefficient de risque à la dose annuelle d'un individu ingérant du tritium dans les conditions précédemment évoquées donne pour cet individu un risque de l'ordre de 1 sur 10 millions de développer un cancer mortel. En conclusion, il convient enfin de rappeler que l'estimation de ce risque est conservatrice du fait d'une part, de l'attitude prudente de la CIPR dans l'établissement du coefficient de risque, et, d'autre part, des hypothèses de consommation alimentaire de produits locaux uniquement, pour le calcul de la dose individuelle.

**Remerciements.** Les auteurs remercient tout particulièrement M. Belot de l'Institut de Protection et de Sécurité Nucléaire pour ses précieux conseils.

## RÉFÉRENCES

- ANDRA (1995) Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs, Centre de La Manche, La surveillance de l'environnement, résultats des mesures, 4<sup>e</sup> trimestre 1995, 8<sup>e</sup> édition.
- Baden-Württemberg (1993) Berichte der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg radioaktivität in Baden-Württemberg, *Jahresbericht* 1993, Allemagne.
- Belot Y., Roy M., Métivier H. (1996) Le Tritium, de l'environnement à l'homme, IPSN, Éditions de Physique.
- CCE (1994) Commission des Communautés Européennes, Environmental Radioactivity in the European Community 1987-1990, *Radiation Protection* No. 47, CCE DGXI.
- CIPMS (1994) Commission Internationale pour la Protection de la Moselle et de la Sarre Contre la Pollution, Qualité des eaux de la Moselle, de la Sarre et de leurs affluents, année 1993, Moulins-lès-Metz, France.
- CIPR (1990) Commission Internationale de Protection Radiologique, Recommandations 1990 de la Commission Internationale de Protection Radiologique, Publication 60 de la CIPR Pergamon Press, Oxford.
- CIPR (1995) Commission Internationale pour la Protection du Rhin, Tableaux numériques des analyses physico-chimiques des eaux du Rhin et des matières en suspension, année 1993, Coblenz, Allemagne.
- CRII-RAD (1994) *Radioactivité*, Revue d'information de la CRII-RAD, n° 2, Juillet 1994.
- HMIP (1994) Her Majesty's Inspectorate of Pollution, Monitoring Programme, Radioactive Substances Report for 1993, Grande-Bretagne.
- OFSP (1994) Office Fédéral de la Santé Publique, division de la radioprotection, Radioactivité de l'environnement et doses de rayonnement en Suisse en 1993, Fribourg, Suisse.
- OMS (1994) Organisation Mondiale pour la Santé, *Directives de qualité de l'eau de boisson*, Deuxième édition, Vol. 1, Recommandations, OMS, Genève, 1994.
- OPRI (1995) Office de Protection contre les Rayonnements Ionisants, Communication Personnelle.
- OPRI (1996) Office de Protection contre les Rayonnements Ionisants, Rapport d'activité 1995, Le Vésinet, France.
- UNSCEAR (1982) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources, effects and risks of ionizing radiation, UNSCEAR-Report to the general assembly, United Nations, New York.
- UNSCEAR (1993) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources, effects and risks of ionizing radiation, UNSCEAR-Report to the general assembly, United Nations, New York.