Impact radioécologique et sanitaire de la contamination par le carbone-14 du site de Ganagobie (Provence, France)

F. LEPRIEUR¹, G. LINDEN¹, J.L. PASQUIER¹

(Manuscrit reçu le 7 août 2002, accepté le 4 décembre 2002)

RÉSUMÉ

Implantée à Ganagobie, la société Isotopchim était spécialisée dans la synthèse de molécules organiques radioactives (carbone-14). En 2001, l'OPRI est intervenu à la demande de la Préfecture afin d'évaluer l'impact dosimétrique et par conséquent le risque sanitaire lié à la contamination du site et son extension géographique. L'étude de la répartition spatiale du carbone-14 a mis en évidence des niveaux de radioactivité très importants dans différentes parties de l'usine et notamment le laboratoire avec une contamination surfacique supérieure à 20 000 Bq/cm². Cette étude a également révélé l'association de matières fortement radioactives avec des produits chimiques très inflammables stockés dans des conditions critiques. Suite aux recommandations de l'OPRI, un périmètre de sécurité a été mis en place autour de l'usine afin d'éviter toute dispersion incontrôlée de la radioactivité. La cartographie de l'activité massique du ¹⁴C a mis en évidence un marquage spécifique décroissant en fonction de la distance par rapport au point de rejet d'effluents gazeux et de la dispersion atmosphérique liée aux conditions climatiques locales. Dans un rayon de 50 mètres autour de l'usine, le marquage radioactif est important dans les sols (66 000 Bq/kg C) et les végétaux (25 000 Bq/kg C). Néanmoins, malgré des scénarii extrêmes, les calculs de dose ont révélé des valeurs très inférieures à la limite réglementaire fixée par la directive Euratom 96/29 (1 mSv/an). Ce site représente un cas assez rare de contamination manifeste par le ¹⁴C. Il peut donc conduire *a posteriori* à une étude *in situ* des processus de répartition, d'élimination ou de concentration du carbone-14 dans les sols et les indicateurs biologiques.

ABSTRACT

Radioecology and health impact of the carbon-14 contamination on the Ganagobie site (Provence, France).

In 2001, at the Prefecture's request an investigation was carried out by OPRI at Isotopchim (Ganagobie), an industrial firm specialized in organic radioactive molecule synthesis (mainly carbon-14), in order to evaluate the dosimetric and consequently the health impact related to the site's contamination and its geographical spreading. The study of the carbon-14 air spreading brought to the fore high radioactivity levels in different areas of the plant especially in the laboratory where the surface contamination reached a level higher than 20 000 Bq/cm². The study also demonstrated the association of strongly radioactive materials with highly inflammable chemicals stored in critical conditions. As a result of OPRI's recommendations, a security perimeter was set up around the plant in order to avoid any uncontrolled spreading of the radioactivity. The cartographic study showed the decrease of the specific marking proportionally to the distance with regard to the point of release and to the atmospheric spreading linked to local climatic conditions.

¹ IRSN, B.P. 35, 78116 Le Vésinet Cedex, France.

A significant radioactive marking was measured in the soils (66 000 Bq/kg C) and in the plants (25 000 Bq/kg C) within a 50 meters radius around the facility. In spite of the extreme scenario, the values showed after the dose calculations were much inferior to the authorized limit set out by Directive Euratom 96/29 (1mSv/year). The site features a rather rare example of manifest carbon-14 contamination. Therefore, it can lead to a further *in situ* study of the repartition, elimination or concentration of the carbon-14 in the soil and in the biological indicators.

1. Introduction

En 1989, la société Isotopchim implantée dans le quartier du Belvédère à Ganagobie (Haute-Provence) reçoit l'autorisation par arrêté préfectoral d'exploiter une unité de synthèse de molécules radioactives (ICPE). De 1995 à 1998, l'Office de protection contre les rayonnements ionisants (OPRI) effectue six campagnes de mesures et de prélèvements afin de contrôler la radioactivité à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments d'Isotopchim. Dès 1995, les résultats mettent en évidence une contamination importante de l'environnement immédiat du site. Après plusieurs suspensions d'activité par arrêté préfectoral, la fermeture définitive de l'usine est décidée en novembre 1997. En 1998, « l'affaire des boues radioactives de Ganagobie », largement évoquée dans la presse locale, relance le débat sur la contamination et la réhabilitation du site.

La liquidation judiciaire de la société Isotopchim impliquant la cessation définitive d'activité est prononcée en septembre 2000. Suite à la réunion du 15 décembre 2000 tenue sur l'initiative de monsieur le Préfet des Alpes de Haute-Provence, l'OPRI a fait l'objet d'une saisie sur le risque sanitaire lié à la contamination du site de Ganagobie par la société Isotopchim et sur l'extension géographique de cette contamination environnementale.

L'objet de cet article est donc de présenter les résultats de la campagne de mesures réalisée à cet effet en avril 2001 dont l'objectif était de préciser au mieux l'urgence et les conditions d'une future réhabilitation des lieux. Afin de déterminer l'étendue et l'intensité de la pollution par le carbone-14, tant à l'intérieur des locaux d'Isotopchim qu'à l'extérieur (quartier du Belvédère et environnement éloigné), les équipes de l'OPRI ont procédé à de nombreuses mesures radiométriques sur place et au prélèvement d'une centaine d'échantillons dans l'environnement du site. Ce travail a été réparti en trois études :

- une étude radiométrique des locaux de la société Isotopchim c'est-à-dire pour l'essentiel un contrôle de la contamination surfacique à l'aide de polyradiamètres dans les différentes parties du bâtiment. Afin d'effectuer des comparaisons avec les résultats de 1995 et 1997, des prélèvements surfaciques (frottis) ont en outre été réalisés aux mêmes points ;

- une étude de la contamination par le carbone-14 de l'environnement du site. Cette étude comporte elle-même deux volets distincts. L'OPRI a d'abord procédé à une campagne de prélèvements avec pour dessein d'établir une cartographie des lieux contaminés. Le deuxième volet concerne l'échantillonnage supplémentaire sur les productions locales afin d'évaluer les transferts à la chaîne alimentaire ;
- un bilan sanitaire afin d'évaluer la dose reçue par la population vivant sur le site du Belvédère à Ganagobie. Il s'agit d'appréhender la part respective de toutes les sources potentielles d'exposition, d'évaluer les différentes voies d'exposition et d'en effectuer le cumul.

2. Description du site

Le village de Ganagobie est situé en bordure de la Durance, à 85 km au nord-est de Marseille, entre Forcalquier et Digne-les-Bains. Il est dominé par un plateau qui culmine à 719 m d'altitude. Le lieu-dit du Belvédère, où se trouvent les bâtiments de la société Isotopchim, se situe au pied de l'extrémité nord de ce plateau qui domine la Durance de près de 350 m. Le plateau de Ganagobie est un haut lieu touristique qui abrite un monastère fondé vers le X^e siècle occupé depuis 1992 par des bénédictins d'Hautecombe. Le prieuré est construit vers la cote 650 m et le point le plus bas se situe aux environs de 620 m. Le site se situe au niveau de l'étage méditerranéen. Sur ce versant ensoleillé du plateau de Ganagobie, la végétation se compose essentiellement d'épais taillis de chênes verts auxquels s'associe en peuplement mixte le pin d'Alep. Sur les sols plus profonds au pouvoir de rétention en eau plus important mais bien drainés, le chêne pubescent (ou chêne blanc) se substitue au chêne vert.

3. Étude de la contamination des locaux de la société Isotopchim

3.1. Mesures de contamination avec radiamètres portables et prélèvements surfaciques

Un contrôle de la contamination a été réalisé dans les différentes parties du bâtiment d'Isotopchim. Les mesures ont été effectuées avec des radiamètres portables dont les caractéristiques techniques sont les suivantes : polyradiamètre MIP 21 avec une sonde bêta de faible énergie à deux détecteurs SBM-2D, le bruit de fond mesuré étant de 0,6 coup/s.

Les mesures de champs de rayonnement à l'intérieur des locaux de l'usine et dans ses abords immédiats attestent de niveaux de contamination plus préoccupants que ceux évalués lors des études précédentes (Fig. 1).

Figure 1 – Résultats des mesures radiométriques (coups/s).

Results of the radiometric measurements (shocks/s).

Plusieurs foyers très contaminés ont ainsi été répertoriés à l'aide des radiamètres : la sorbonne du laboratoire (7 000 c/s), le laboratoire et la boîte à gants (8 500 c/s), les bacs de décantation de la laverie (saturation à 9 999 c/s) et enfin le local extérieur de stockage des déchets radioactifs (7 000 c/s).

En tenant compte des résultats des mesures de contamination (Fig. 1), des prélèvements ont été effectués à l'intérieur des locaux aux points présentant les niveaux d'activité bêta les plus importants et aux endroits déjà analysés dans le passé. Les résultats des frottis humides (surface de référence = 100 cm²) effectués le 18 avril 2001 ont confirmé les mesures effectuées à l'aide des radiamètres et notamment la contamination des sorbonnes du laboratoire (> 700 Bq de ¹⁴C/cm²), du sol du laboratoire à proximité de la boîte à gants (> 21 000 Bq de ¹⁴C/cm²), et de la laverie (> 230 Bq de ¹⁴C/cm²). Les résultats des prélèvements de dépôts secs de la laverie (bacs de décantation) ont mis en évidence des niveaux de contamination (> 2 000 000 Bq de ¹⁴C/échantillon) très préoccupants d'un point de vue radiologique et sanitaire (Leprieur *et al.*, 2001).

3.2. Bilan et actions engagées

Globalement, l'étude de la contamination des locaux a montré une augmentation importante des niveaux de radioactivité aussi bien à l'intérieur qu'aux abords immédiats et sur le toit du bâtiment. Sur le seuil du local de stockage des déchets radioactifs, situé à l'extérieur du bâtiment et accessible au public, le niveau de radioactivité bêta a également nettement augmenté. Suite aux recommandations de l'OPRI, un périmètre de sécurité a été mis en place en juin 2001 autour du bâtiment principal afin d'éviter toute dispersion incontrôlée de la radioactivité par des allers et venues de personnes.

Des intervenants de l'OPRI se sont rendus en octobre 2001 dans les anciens locaux de la société Isotopchim afin de procéder au contrôle de contamination des produits chimiques encore présents sur le site, en vue de leur prise en charge et de leur élimination par une société spécialisée. Cette intervention a permis d'évacuer environ 40 à 50 % des produits chimiques qui étaient entreposés dans les bâtiments. Il reste encore sur le site une quantité non négligeable de produits chimiques « contaminés » ainsi que des produits potentiellement dangereux (conteneurs de gaz chimiques). Le site n'est donc pas encore complètement sécurisé.

4. Étude de la contamination de l'environnement du site

La zone d'étude délimitée pour ce travail tient compte du constat de la situation effectué lors des campagnes précédentes (OPRI, 1996) ainsi que de la

configuration des lieux (topographie, rose des vents). La nature des échantillons prélevés a été choisie en tenant compte des observations écologiques effectuées sur la zone d'étude (répartition homogène de l'espèce sélectionnée).

4.1. Échantillonnage environnemental et échantillonnage sur les produits locaux consommés

L'échantillonnage environnemental avait pour objectif d'établir une cartographie afin de caractériser l'étendue et l'intensité de la pollution par le carbone-14 à l'extérieur de l'usine. L'analyse de l'historique du site à partir des études antérieures permet d'identifier les potentialités de marquage des sols et de certains végétaux situés à proximité de l'usine (haie de troènes, romarin, chêne vert, etc.). Un choix varié d'espèces (ligneuses et herbacées) a été opéré en fonction de leur répartition sur la zone d'étude et de leur état végétatif au moment de la campagne d'échantillonnage. L'analyse du carbone-14 dans le bois a été effectuée sur des échantillons prélevés par carottage (2 cm de profondeur) dans le cambium et l'aubier.

Afin de tenir compte de l'inquiétude de la population de Ganagobie, un échantillonnage supplémentaire sur des produits locaux ainsi que sur des herbes aromatiques de la région a été réalisé. La qualité du sol ne permettant pas aux habitants de cultiver des potagers sur le site du Belvédère, les légumes sont rares. Néanmoins nous avons tenté de récolter tous les produits consommés ou susceptibles de l'être (herbes aromatiques de la garrigue environnante).

Globalement, les résultats obtenus dans l'environnement du site en 2001 sont nettement inférieurs à ceux mesurés lors des campagnes précédentes alors que l'usine Isotopchim était en activité (Tab. I).

TABLEAU I
Variation des niveaux de contamination en carbone-14 (Bq/kg de carbone).
Variation of carbon-14 contamination levels (Bq/kg of carbon).

Année	sol	herbe	feuilles de chêne vert	aiguilles de pin d'Alep	feuilles de troène
1995	2×10^6	67 000	350 000	41 000	350 000
1998	60 000	20 000	520 000	26 000	395 000
2001	66 000	2 000	40 000	3 000	6 500

Ce constat paraît logique, la diminution des niveaux de ^{14}C après plus 3 ans d'arrêt de fonctionnement de l'usine est significative dans l'ensemble des végétaux prélevés lors de cette campagne d'échantillonnage. Néanmoins, le marquage en carbone-14 de l'environnement immédiat de l'usine reste important

Figure 2 – Cartographie de la contamination par le ^{14}C de l'environnement d'Isotopchim.
 Cartography of the ^{14}C contamination in the environment of Isotopchim.

dans les sols (66 000 Bq/kg C), les arbres (25 000 Bq/kg C), les feuilles d'arbres (40 000 Bq/kg C) ainsi que dans tous les végétaux situés dans ce périmètre. La figure 2 permet d'identifier les zones fortement contaminées en gris foncé (5 000 à 60 000 Bq/kg C) et les zones plus faiblement contaminées en gris clair

Figure 3 – Évolution de la contamination par le carbone-14 du bois après identification des anneaux de croissance (cernes).

Evolution of the carbon-14 contamination in the wood after age ring identification.

(500 à 5 000 Bq/kg C). Cette modélisation, composée à partir de l'extrapolation des résultats obtenus sur la zone d'étude, a permis de préciser au mieux les zones concernées par la réhabilitation ultérieure du site.

4.2. Dendrochronologie

L'observation d'une section horizontale de bois permet d'observer les anneaux de croissances (ou cernes). Les cernes permettent d'identifier la matière formée par l'arbre pendant une année précise (dendrochronologie). On sait cependant que les cernes d'aubier ne sont pas « imperméables » aux échanges de matières carbonées. Seuls 80 % de la masse de matière carbonée dans des cernes sont fixés. Les 20 % restant participent aux échanges avec les cernes voisins. Par conséquent, une contamination atmosphérique par le ^{14}C se manifestera par un pic étalé sur plusieurs années. Cet aspect constitue la principale source d'imprécision sur les mesures de carbone-14 effectuées sur le bois. Cette imprécision n'est pas gênante pour la détection d'activités significatives en ^{14}C mais peut rendre invisible des signaux proches du bruit de fond (Loyen et Robert, 2000).

Sur une section de chêne vert prélevée sur le site contaminé de Ganagobie, des carottages ont été effectués sur sept périodes. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 3. Entre 1945 et 1960, les valeurs sont proches de la teneur naturelle en ^{14}C (300 Bq/kg C). De 1965 à 1985, l'apport de ^{14}C (800 Bq/kg C) est en partie

imputable aux essais nucléaires atmosphériques pratiqués depuis le début des années 60. Enfin, entre 1985 et 1995, la période de fonctionnement de l'usine Isotopchim est nettement visible (3 500 Bq/kg C).

Les prélèvements de bois ont mis en évidence une contamination importante des arbres présents sur le site du belvédère (jusqu'à 25 000 Bq/kg C). Concernant la zone boisée située près de l'usine sous les vents dominants, l'utilisation des arbres comme bois de chauffe a été vivement déconseillée d'un point de vue sanitaire afin d'éviter l'émission de CO₂ marqué au ¹⁴C lors de sa combustion.

5. Évaluation de l'impact dosimétrique

La méthodologie adoptée permettant d'évaluer le transfert à l'homme du carbone-14 contenu dans les rejets de l'usine consiste à mesurer les concentrations en carbone-14 dans l'environnement et à estimer en conséquence l'impact sur des groupes de population compte tenu de leur localisation géographique, de leur mode de vie et de leur utilisation de l'environnement.

Cette étude avait donc pour objectif d'évaluer l'exposition de la population résidant sur le site du Belvédère (quartier de Ganagobie où se situe l'usine) et au prieuré de Ganagobie (site hautement touristique) à partir des analyses effectuées sur les végétaux et les sols prélevés dans l'environnement proche de l'usine Isotopchim.

5.1. Le contexte réglementaire

La directive 96/29/Euratom (CCE, 1996) et le décret n° 2002-460 (2002) relatif à la protection générale des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants fixent les limites tolérées des doses d'exposition. La somme des doses efficaces reçues ne doit pas dépasser 1 mSv par an pour le public (Journal officiel de la République française, 6 avril 2002). À titre indicatif, l'ensemble des sources d'irradiation naturelles contribue à la dose efficace moyenne pour environ 2,4 mSv/an.

5.2. Le concept d'exemption

L'exemption est un concept sur lequel un consensus international élargi est réalisé. Certaines activités ne justifient pas une pleine application de la réglementation, car l'exposition supplémentaire qu'on s'attend à ce qu'elle produise est insignifiante. Par rapport à la réaction de la société face aux risques liés à d'autres activités et à la perception desdits risques, le principe d'exemption s'incarne en une dose annuelle d'environ 10 microsieverts (0,01 mSv), ce qui équivaut à moins de 1 %

de la dose due au rayonnement naturel. Les doses de cet ordre peuvent en effet être considérées comme insignifiantes d'un point de vue sanitaire (IAEA, 2000).

5.3. Les calculs de doses

5.3.1. Hypothèses retenues pour l'évaluation des doses

L'évaluation de l'impact dosimétrique nécessite d'adopter des hypothèses simplificatrices. La transformation de l'activité massique en dose efficace est complexe. Les calculs sont effectués à partir :

- des résultats de mesures d'activités massiques des différents paramètres du milieu avec lesquels l'homme entre en contact, notamment de la chaîne alimentaire ;
- des coefficients de dose repris en annexe de la directive 96/29 ;
- du taux de consommation du produit alimentaire ingéré.

Dans cette étude, nous avons considéré que les personnes constituant les groupes « critiques » susceptibles d'être exposés résidaient en permanence sur place et consommaient uniquement les produits cultivés dans leurs potagers ou récoltés dans la garrigue environnante (herbes aromatiques). Cette situation est sans doute relativement éloignée de la réalité mais elle présente l'intérêt de fournir une valeur « enveloppe » de l'impact dosimétrique. Les doses calculées sont les doses à l'organisme entier également appelées « doses efficaces ».

5.3.2. Échantillonnage

Compte tenu des différentes capacités de fixation du carbone-14, des légumes-racines (asperge, pomme de terre) et des légumes-feuilles (salade, fenouil) généralement plus sensibles aux dépôts directs ont été prélevés, ainsi que des herbes aromatiques consommées essentiellement pour leurs feuilles et pouvant donc être assimilées à des légumes-feuilles.

Le thym et le romarin constituent d'excellents indicateurs biologiques permettant de détecter une accumulation chronique due au transfert par les racines. Étant donné leur faible hauteur, ils peuvent être facilement recontaminés lors des turbulences qui dispersent les poussières au sol (Foulquier et Breteau, 1998). Bien qu'ils ne soient pas des composants essentiels de la ration alimentaire, ils sont susceptibles de jouer un rôle significatif dans l'incorporation de radionucléides par l'homme.

5.3.3. Choix des taux de consommation

Pour le choix des taux de consommation, les enquêtes alimentaires sont nécessaires pour connaître les habitudes locales et les rations alimentaires des

TABLEAU II
Ration alimentaire annuelle par personne en France (kg an⁻¹ ou l an⁻¹).
Annual food intake by person in France (kg year⁻¹ or l year⁻¹).

Source : INSEE	zone sud de la France	France
produits d'origine végétale		
légumes-feuilles	16,0	15,3
légumes-racines	46,7	53,7
légumes-fruits	17,6	14,8
pommes de terre	35,4	40,7
tomates	13,5	10,5
fruits frais	44,0	38,6
huiles	11,5	8,5
vins	30,1	35,6

individus des groupes de référence. Pour les calculs, des données de l'INSEE (Bertrand, 1993) sur la population du sud de la France ont été utilisées (Tab. II).

5.4. Évaluation de la dose reçue par la population

5.4.1. Inhalation

Le corps humain contient naturellement quelques 3 000 Bq de carbone-14. L'ingestion annuelle de ¹⁴C, dans la nourriture courante, est d'environ 30 000 Bq. La quantité de carbone ingérée par jour, environ 300 g, est presque entièrement absorbée (99,9 %). Il est donc admis que le carbone-14 intégré par l'homme provient essentiellement de la nourriture ingérée et non par inhalation (l'apport par inhalation étant de l'ordre de 3 g de carbone par jour, dont seulement 1 % est fixé dans l'organisme ; OMS, 1987). En 1995, pendant le fonctionnement de l'usine Isotopchim, la dose due à l'activité volumique en carbone-14 de l'air avait été évaluée à 7 µSv/an pour les habitants du quartier. Quatre ans après la fin des rejets atmosphériques de l'usine et en se référant aux mesures de 1995 (OPRI, 1996), on peut donc considérer que la dose efficace due à l'inhalation de particules par une personne résidant en permanence à Ganagobie est insignifiante.

5.4.2. Ingestion

Le calcul de la dose annuelle due à l'ingestion passe par l'évaluation de l'activité incorporée et l'utilisation de dose par unité d'incorporation (Sv par Bq ingéré) prenant en compte la biocinétique et les caractéristiques des éléments. Pour un

radionucléide et un produit alimentaire, ce calcul est :

$$H_{E(ing)} = C \times TC \times FD_{ing}$$

avec :

- $H_{E(ing)}$: dose annuelle due à l'ingestion d'un radionucléide dans un produit alimentaire ($Sv\ an^{-1}$),
- C : concentration du radionucléide dans le produit alimentaire considéré ($Bq\ kg^{-1}$),
- TC : taux de consommation du produit alimentaire ($kg\ an^{-1}$),
- FD_{ing} : dose par unité d'incorporation (DPUI) par ingestion du radionucléide ($Sv\ par\ Bq\ ingéré$).

Les valeurs de la dose par unité d'incorporation par ingestion du radionucléide (FD_{ing}), publiées dans la directive 96/29/Euratom (CCE, 1996 ; ICRP, 1996), varient en fonction des caractéristiques physico-chimiques du radionucléide considéré et de la classe d'âge de la population.

Pour le calcul de dose, les valeurs du ^{14}C relatives à la classe d'âge inférieure à 1 an et supérieure à 17 ans ont été choisies, soit respectivement $FD_{ing} = 1,4 \times 10^{-9}\ Sv\ Bq^{-1}$ et $FD_{ing} = 5,8 \times 10^{-10}\ Sv\ Bq^{-1}$.

Sur le site de Ganagobie, la qualité du sol ne permettant pas aux habitants de cultiver des potagers, les légumes sont rares. Le calcul de la dose due à la consommation exclusive de ces végétaux est obtenue à partir des résultats obtenus sur les quelques légumes récoltés (notamment au prieuré) et, pour l'essentiel, sur les herbes aromatiques (annuelles, vivaces, ou arbustives) abondantes sur le site. Les végétaux vivaces constituant de meilleurs intégrateurs pluriannuels de contamination (accumulation due au transfert par les racines et à l'activité photosynthétique), le calcul a été effectué pour les végétaux annuels herbacés d'une part (légumes), et pour les végétaux vivaces et arbustifs d'autre part (thym, laurier, romarin). Ce raisonnement permet également l'utilisation de taux de consommation appropriés pour chaque type de calcul (la consommation d'herbes aromatiques étant bien moindre que celle des légumes). Les résultats sont synthétisés dans le tableau III.

Une consommation exclusive de végétaux issus du site du Ganagobie entraînerait une exposition annuelle variant de $2,3\ \mu Sv\ an^{-1}$ à $21\ \mu Sv\ an^{-1}$. Les doses efficaces calculées sont donc inférieures ou très proches du seuil d'exemption fixé à $10\ \mu Sv\ an^{-1}$. En conclusion, malgré un scénario extrême relativement éloigné de la réalité, la dose reçue par ingestion d'aliments

TABLEAU III

Exposition annuelle due à l'ingestion de végétaux contaminés ($\mu\text{Sv an}^{-1}$).
Annual effective dose due to consumption of contaminated vegetables ($\mu\text{Sv year}^{-1}$).

classe d'âge	dose annuelle à isotopchim		dose annuelle au prieré		activité maximale (en Bq de $^{14}\text{C/kg}$ frais)	
	< 1 an	> 17 ans	< 1 an	> 17 ans	Isotopchim	prieré
légumes-feuilles	2,3	0,9	0,6	0,3	100	25
légumes-racines	16,4	6,8	4,6	1,9	250	70
herbes aromatiques	2,3	0,9	0,2	0,1	1 600	100
TOTAL ($\mu\text{Sv an}^{-1}$)	21	8,6	5,4	2,3		

contaminés est très inférieure à la limite réglementaire pour le public fixée par le décret du 4 avril 2002 (1 mSv an^{-1}).

5.4.3. Ingestion par inadvertance

La contamination importante des sols, déjà mise en évidence lors des missions précédentes, varie entre 10 000 et 70 000 Bq $^{14}\text{C/kg}$ C dans un rayon approximatif de 25 mètres autour de l'usine. L'évaluation de la dose reçue dans le cas d'une ingestion de sol par inadvertance est donc intéressante compte-tenu des niveaux de contamination et de la présence d'enfants jouant à proximité de l'usine. Les valeurs retenues pour les paramètres d'ingestion par inadvertance (Tab. IV) sont celles préconisées par le National Radiological Protection Board (Robinson, 1996).

TABLEAU IV

Valeurs préconisées pour l'ingestion de sol par inadvertance (g an^{-1}).
Values recommended for inadvertently ingested soil (g year^{-1}).

ingestion par inadvertance	age = 1 an	age = 5 ans	age = 10 ans	age = 15 ans	adulte
sol (g an^{-1})	37	18	11	7,3	3,7

En considérant que l'activité massique maximale du sol sur le site du Belvédère est 100 000 Bq $^{14}\text{C/kg}$ de carbone soit 8 000 Bq/kg de sol, la dose reçue par un enfant de 1 an ingérant par inadvertance 37 g de sol (valeur moyenne annuelle) serait de $0,47 \mu\text{Sv an}^{-1}$. Pour les autres classes d'âge, le calcul donne des résultats inférieurs à $0,47 \mu\text{Sv an}^{-1}$. La dose incorporée due au carbone-14 dans le cas d'une ingestion de sol par inadvertance est donc très faible quelle que soit la classe d'âge considérée.

5.4.4. Irradiation externe

Les particules en suspension dans l'air ou déposées sur le sol sont les principales sources d'irradiation externe. Le rayonnement bêta émis par le carbone-14 ayant un faible pouvoir de pénétration dans l'air (inférieur à 3 cm), les valeurs des coefficients de dose efficace du carbone-14 dans l'air et sur le sol, issues du *Federal Guidance No. 12* (Eckerman et Ryman, 1993), sont relativement faibles : $FD_{\text{air}} = 7,06 \times 10^{-12} \text{ Sv an}^{-1}/\text{Bq m}^{-3}$ et $FD_{\text{sol}} = 2,27 \times 10^{-15} \text{ Sv an}^{-1}/\text{Bq m}^{-3}$. Le calcul de la dose due à l'irradiation externe est obtenu par la formule :

$$H_{\text{E(ext)}} = (C_{\text{air}} \times FD_{\text{air}}) + (C_{\text{sol}} \times FD_{\text{sol}}).$$

Étant donné les valeurs très faibles des coefficients de dose (FD), la concentration du carbone-14 dans l'air (proche de la teneur atmosphérique actuelle, trois ans après la fin des rejets de l'usine) et malgré des concentrations encore élevées en ^{14}C dans les sols, la dose due à l'exposition externe peut raisonnablement être considérée comme négligeable.

6. Conclusion

L'analyse radioécologique approfondie du site de Ganagobie a permis d'estimer au mieux les expositions de la population. À partir des activités mesurées dans l'environnement et des habitudes de vie déterminées sur la base d'enquêtes locales (localisation géographique des groupes de population, consommation des produits alimentaires) les activités incorporées par l'organisme ont été calculées. Notre approche a conduit à adopter des valeurs extrêmes pour les différents paramètres intervenant dans le calcul de l'impact dosimétrique et en particulier à définir des groupes de référence « hypothétiques » de par leurs taux de consommation et leur lieu de séjour permanent. La dose efficace reçue, essentiellement par ingestion d'aliments contaminés, serait de 0,47 à 21 $\mu\text{Sv/an}$. Ces résultats sont à comparer à la limite de 1 mSv/an pour le public fixée par le décret du 4 avril 2002 et, à titre indicatif, à la dose efficace moyenne due aux sources d'irradiation naturelle (2,4 mSv/an).

Compte tenu de l'impact dosimétrique évalué à partir des niveaux d'activités mesurés dans les différents compartiments du milieu terrestre environnant, notamment dans les légumes cultivés et les indicateurs biologiques de type thym et romarin (également consommés), il n'y a pas eu lieu de restreindre la consommation des productions maraîchères ou fruitières provenant du village de Ganagobie. Les différents aspects de la procédure qui pourrait être mise en œuvre en vue de l'assainissement radioactif des locaux ont été évoqués avec les autorités locales et l'ANDRA. Cette opération aura certainement un coût relativement élevé

compte tenu notamment de la diversité des produits contaminés, des difficultés de caractérisation des déchets et de la nécessité de faire appel à une société de décontamination.

Ce site représente un cas assez rare de contamination manifeste par le carbone-14 du fait de la durée du rejet responsable de ce marquage, de l'intensité et de l'étendue de la contamination qui en résulte. Il peut donc conduire *a posteriori* à une étude *in situ* des processus de répartition, d'élimination ou de concentration du carbone-14 dans les sols et dans les indicateurs biologiques. En effet, le carbone-14 est l'un des radionucléides les plus répandus dans l'environnement. Cet isotope radioactif, d'origine naturelle et artificielle, est très mobile dans l'environnement et s'incorpore facilement dans les chaînes trophiques essentiellement *via* la production primaire. En outre, il possède une demi-vie assez longue (période = $5\,730 \pm 40$ ans).

Les connaissances scientifiques actuelles relatives à l'effet des faibles doses de rayonnement bêta ne permettent pas de dire si en dessous d'un certain niveau, le risque devient nul. La quantification du risque par des études épidémiologiques est pour le moment impossible car peu de sites potentiellement contaminés par le carbone-14 permettent de telles études et les populations-témoins, souvent trop petites, sont généralement soumises à d'autres expositions plus importantes ou du même ordre de grandeur, comme l'irradiation naturelle. Ce même problème des faibles doses se pose pour de nombreux éléments cancérigènes (amiante) sans que cela empêche d'analyser et de gérer les risques.

Au-delà de l'impact dosimétrique individuel relativement faible, y compris pour les populations considérées comme les plus exposées, cette contamination pose la question à ce jour non résolue mais préoccupante de la modification sur le long terme du rapport isotopique « naturel » pour un élément aussi essentiel à la vie que le carbone. D'autres régions de France peuvent être concernées par cette problématique, en particulier quelques zones très circonscrites du Nord-Cotentin situées sous les vents dominants de l'usine de retraitement de La Hague où de faibles variations du rapport isotopique du carbone ont été observées.

RÉFÉRENCES

- Bertrand M. (1993) *Consommation et lieux d'achat des produits alimentaires en 1991*, Collection INSEE Résultats, Paris.
- CCE (1996) directives 96/29/Euratom du Conseil du 13 mai 1996, fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants, Journal officiel des Communautés européennes du 29 juin 1996, Office des publications officielles des communautés européennes.

- Décret n° 2002-460 du 4 avril 2002 relatif à la protection générale des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants, Journal officiel du 6 avril 2002.
- Eckerman K.F., Ryman J.C. (1993) *External exposure to radionuclides in air, water and soil*, Federal Guidance report No. 12, Oak Ridge National Laboratory.
- Foulquier L., Bretheau F. (1998) Les installations nucléaires et l'environnement – Méthode d'évaluation de l'impact radioécologique et dosimétrique, pp. 105-110, collection IPSN, EDP Sciences, Les Ulis.
- IAEA (2000) Bulletin de l'International Atomic Energy Agency **42**, mars 2000, pp. 38-40.
- ICRP publication 72 (1996) Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 5 – Compilation of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients, *Ann. ICRP* **26**(1).
- Leprieur F., Linden G., Pasquier J.L. (2001) *Contamination par le carbone-14 du site de Ganagobie par la société Isotopchim*, rapport Office de protection contre les rayonnements ionisants/sous-direction de l'Impact sanitaire, Le Vésinet.
- Loyen J., Robert F. (2000) *Mise au point d'un dosage du carbone-14 dans les échantillons de l'environnement*, rapport Office de protection contre les rayonnements ionisants/sous-direction de l'Impact sanitaire, Le Vésinet.
- OMS (1987) Critères d'hygiène de l'environnement n° 25, Programme international sur la sécurité des substances chimiques (IPCS), Bureau des publications de l'Organisation mondiale de la santé, Genève.
- OPRI (1996) *Société Isotopchim à Ganagobie – novembre 1995*, rapport de contrôle, Office de protection contre les rayonnements ionisants, Le Vésinet.
- Robinson C.A. (1996) *Memorandum – Generalised habit data for radiological assessments*, NRPB-M636, National Radiological Protection Board, Chilton, United Kingdom.