

Évaluations dosimétriques relatives aux options de gestion de
l'environnement contaminé en carbone 14 autour de l'ancien
laboratoire de la société Isotopchim à Ganagobie

DEI/SESURE/2009-40

DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET DE
L'INTERVENTION

Service d'étude et de surveillance de la radioactivité dans
l'environnement

Demandeur	ANDRA - CNAR
N° action/Processus de rattachement	R1

Évaluations dosimétriques relatives aux options de gestion
 de l'environnement contaminé en carbone 14
 autour de l'ancien laboratoire de la société Isotopchim à Ganagobie

S. Roussel-Debet

Laboratoire d'études radioécologiques en milieux continental et marin

DEI/SESURE/2009-40

	Réservé à l'unité		Visas pour diffusion		
	Auteur(s)	Vérificateur	Chef du SESURE	Directeur de la DEI	Directeur Général de l'IRSN *
Noms	S. ROUSSEL-DEBET	P. RENAUD	J.-M. PERES	D. CHAMPION	J. REPUSSARD
Dates	3/12/09	3/12/09	5/12/09	18/12/09	
Signatures					

DIFFUSION : Libre Interne Limitée

LISTE DES PARTICIPANTS

Philippe Renaud	IRSN/DEI/SESURE/LERCM	Expertise in situ - Avis sur les scénarios - Prélèvements
Lionel Saey	IRSN/DEI/SESURE/LERCM	Prélèvements - Traitement d'échantillons - Enquête locale
Carol Soria, Xavier Amet	IRSN/DEI/SIAR/GIRO/SUD-EST	Historique du site - documentation
Damien Didier	IRSN/DEI/SESUC/BMTA	Avis sur les modalités d'estimation de la dispersion atmosphérique
Catherine Cossonnet	IRSN/DEI/STEME /LMRE	Métrologie
Jeanne Loyen	IRSN/DEI/STEME /LTE	Métrologie

SOMMAIRE

1 INTRODUCTION	7
1.1 CONTEXTE ET QUESTIONNEMENT	7
1.2 CARACTERISTIQUES DU SITE	7
1.3 LE CARBONE 14	9
1.3.1 TRANSFERTS AU SEIN DE L'ECOSYSTEME	9
1.3.2 VOIES D'EXPOSITION POTENTIELLES	12
1.3.3 BRUIT DE FOND DU CARBONE 14	14
1.4 CONTAMINATION EN CARBONE 14 DU SITE DE GANAGOBIE	14
1.4.1 LIMITES DE LA REPRESENTATIVITE DES MESURES	14
1.4.2 RAPPEL DES RESULTATS DE MESURE D'ECHANTILLONS PRELEVES EN 2001	15
1.4.3 RESULTATS DE MESURE D'ECHANTILLONS PRELEVES EN 2009	16
2 EXAMEN DES SCENARIOS PLAUSIBLES ET CONSEQUENCES	19
2.1 INCENDIE DES ARBRES DU BELVEDERE	19
2.1.1 ÉVALUATION SANS PRISE EN COMPTE DU MASSIF FORESTIER AVOISINANT	19
2.1.2 PRISE EN COMPTE DU CARBONE LIE AU MASSIF FORESTIER	20
2.2 BRULAGE PAR UN PARTICULIER D'UN OU PLUSIEURS ARBRES PROVENANT DU BELVEDERE	21
2.3 BROYAGE OU COMPOSTAGE DES DEBRIS VEGETAUX DU PARC	22
2.4 VOIES D'EXPOSITION POTENTIELLES IMPUTABLES AU SOL	22
2.4.1 INGESTION INVOLONTAIRE DE SOL	22
2.4.2 INHALATION D'ACTIVITE EMANEE DU SOL, SOUS LES ARBRES	23
3 RECAPITULATIF DES RISQUES ASSOCIES AUX VOIES D'ATTEINTES CONCEVABLES ET AUX SCENARIOS POSSIBLES ET CONCLUSION	23
4 ANNEXES	25
4.1 ANNEXE 1. ÉMANATION LIE A L'EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE DU SOL	25
4.2 ANNEXE 2. COMPARAISON DES DIFFERENTES VOIES D'ATTEINTE	27
4.3 ANNEXE 3. MASSES DE CARBONE DEGAGEES ET RESIDUELLES LORS D'UNE COMBUSTION	29

4.3.1	ESSAIS REALISES A L'IRSN	29
4.3.2	ESSAIS REALISES PAR L'INERIS	29
4.4	ANNEXE 4. CONSEQUENCES D'UN REJET ATMOSPHERIQUE DURANT UN INCENDIE DE FORET	30
4.5	ANNEXE 5. CONSEQUENCES DE L'INHALATION DE FUMEEES A L'EXTERIEUR DU LOGEMENT	32
4.6	ANNEXE 6. COMPARAISON DE LA RADIOTOXICITE DU CARBONE 14 ET DE LA TOXICITE CHIMIQUE DE L'OXYDE ET DU DIOXYDE DE CARBONE	33
4.7	ANNEXE 7. ESTIMATION DE L'ACTIVITE SPECIFIQUE DES COMPOSTS ISSUS DU PARC	34
5 REFERENCES		35
6 ILLUSTRATIONS : PHOTOS DU SITE (JUILLET 2009)		36

TABLEAUX

<i>Tableau 1. Mesures effectuées sur le site en 2009 et comparaison avec les données antérieures.....</i>	<i>18</i>
<i>Tableau 2. Risques associés aux voies d'atteintes concevables et aux scénarios possibles.....</i>	<i>24</i>

FIGURES

<i>Figure 1. Aspect du site de Ganagobie.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure 2. Schéma du cycle du carbone dans le système sol - plante - atmosphère.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 3. Comparaison schématique des valeurs de doses efficaces par les voies d'atteinte potentielle, en fonction de l'activité spécifique du ¹⁴C en milieu terrestre.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure 4. Résultats des mesures effectuées sur les échantillons de bois, de feuilles d'arbres et de sols prélevés en 2001 (Leprieur et al., 2001).....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 5. Localisation des prélèvements faits en 2009.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 6. Illustration du comportement des matières organiques du sol.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure 7. Illustration d'une courbe de croissance des végétaux couplée à la représentation de la variation de l'activité de l'air et des végétaux.....</i>	<i>31</i>

1 Introduction

1.1 Contexte et questionnement

De 1989 à 1997, la société Isotopchim située à Ganagobie (04) a rejeté du carbone 14, ce qui a conduit à une contamination de l'environnement proche de l'installation, notamment des arbres situés sous les vents dominants, à moins de 50 m des anciens locaux (Leprieur et al., 2001). La Direction générale de la prévention des risques (DGPR) et la Commission Nationale des Aides dans le domaine Radioactif (CNAR) de l'ANDRA ont demandé à l'IRSN d'examiner la question du devenir de ces arbres.

Conformément à la proposition technique et financière ¹ faite par l'IRSN et acceptée par l'Andra ², le présent rapport restitue l'évaluation des conséquences radiologiques qui résulteraient des situations susceptibles de survenir selon les deux options de gestion envisageables :

- le maintien du site en l'état, consistant à laisser sur place les arbres, en continuant l'entretien qui en est fait actuellement ;
- l'enlèvement total ou partiel de ces arbres et leur élimination.

Pour examiner ces situations, il convient d'exposer d'abord quelles sont les caractéristiques d'une part, du site et d'autre part, du comportement du carbone 14, qui vont conduire à retenir ou écarter les différents scénarios susceptibles d'induire un risque dosimétrique.

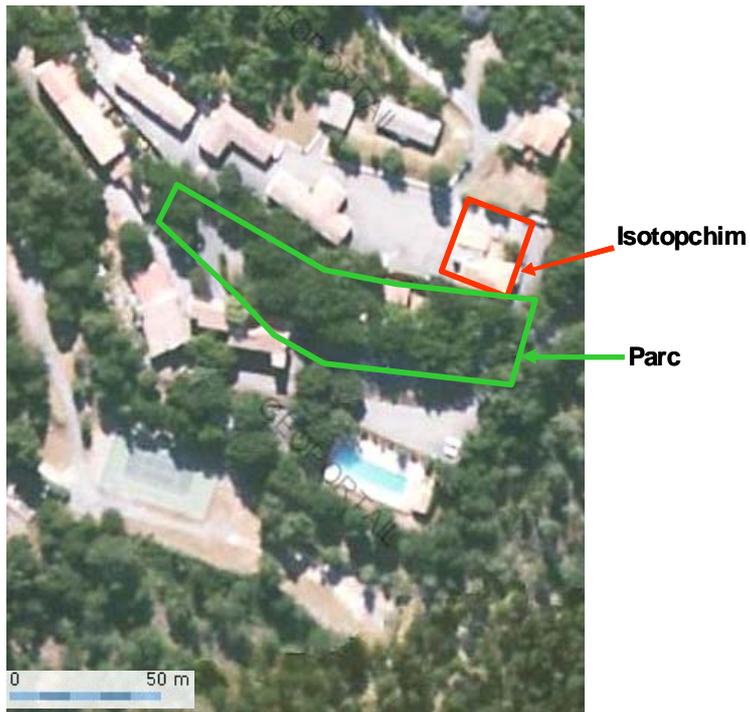
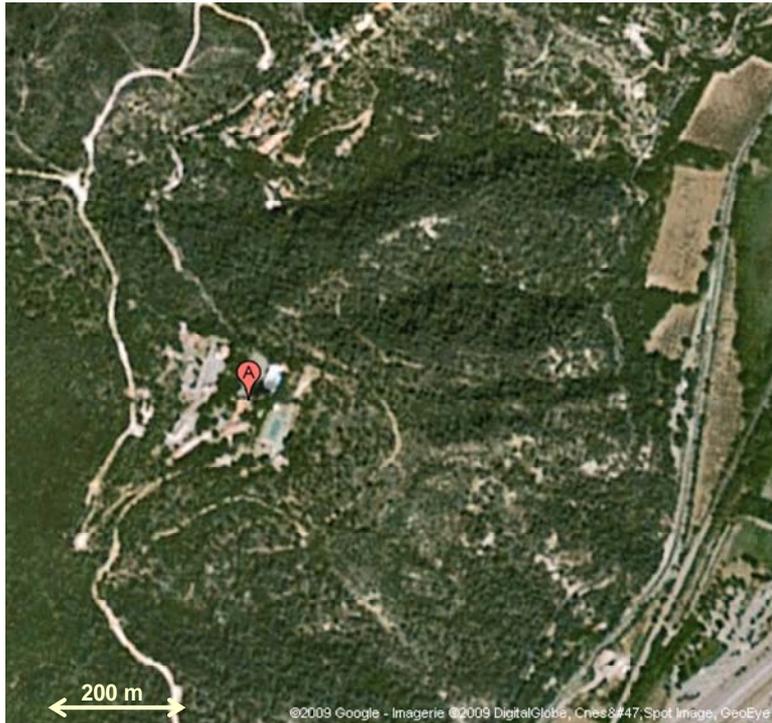
Pour une lecture plus aisée, les développements explicatifs sont reportés en annexe.

1.2 Caractéristiques du site

Le local de la société Isotopchim se trouve sur la commune de Ganagobie, sur le plateau du même nom qui domine le Val de Durance (figure 1). Le site, localisé sur le lieu-dit le Belvédère qui se trouve à une altitude de l'ordre de 550 m, est escarpé et constitué de plusieurs replats d'environ 1500 m² au total. Il se présente comme un ensemble de bâtiments assimilables à un petit lotissement, en grande partie bitumé ou gravillonné, entouré, au delà d'une cinquantaine à une centaine de mètres, d'un massif forestier composé d'arbres de forêt méditerranéenne typique : chênes et pins (cf. photos en fin de document). Outre l'ancien local d'Isotopchim, se trouvent quelques bâtiments vides, ainsi que quelques habitations, des parkings, une placette, une salle de sports, un parc municipal constitué d'une soixantaine d'arbres et comportant des tables de pique-nique, une piscine et une station d'épuration. L'ancien local de la société Isotopchim est une villa entourée d'un grillage et équipée d'une alarme incendie. L'ensemble de cette zone et de ses abords est très soigneusement débroussaillé et entretenu (enlèvement des feuilles mortes et débris végétaux) de façon à assurer une protection contre l'incendie. Les déchets verts ainsi générés sont transportés à la déchèterie de Lurs en vue de leur compostage.

¹ Proposition technique et financière PTF 113330 - Courrier DEI/SESURE/373 du 24 août 2009.

² Commande N° 045237CAA du 11 septembre 2009.



Les photos du site sont reportées en annexe.

Figure 1. Aspect du site de Ganagobie.

1.3 Le carbone 14

L'examen de la situation nécessite non seulement la connaissance de la configuration du site telle que décrite précédemment, mais également des caractéristiques du carbone 14 en termes de modalités de transfert et de voies d'exposition. Ci-après sont donc rappelés les points clefs caractéristiques de ce radionucléide, dont découlent les voies potentielles d'atteinte des personnes.

1.3.1 Transferts au sein de l'écosystème

1.3.1.1 Généralités sur le comportement du carbone

Le carbone 14 suit le cycle du carbone stable.

Le carbone est incorporé dans la matière organique des végétaux quasi exclusivement par photosynthèse, à partir du dioxyde de carbone CO₂, proportionnellement à la constitution de la matière vivante et uniquement durant les phases de croissance du végétal. Le carbone est assimilé durant les périodes où la température extérieure dépasse le *zéro de végétation*³ et hors des périodes de canicule ou de sécheresse intense qui ralentissent l'activité physiologique des végétaux. L'incorporation du ¹⁴C est, en général, quasi nulle en hiver (voire au cœur de l'été), et maximale au printemps-début d'été.

Il n'y a pas de transfert racinaire du carbone du sol vers le végétal, si l'on excepte la très faible possibilité que les racines puissent absorber de très petites molécules organiques solubles ou des carbonates⁴. Un sol contaminé en ¹⁴C ne peut pas donner lieu à une contamination du végétal directement à partir du système racinaire de celui-ci.

Une partie du carbone incorporé par les végétaux (i.e., assimilats photosynthétiques) reste dans les parties persistantes de ceux-ci, une autre partie retournera au sol avec les débris végétaux, feuilles et racines mortes... pour y former la « matière organique du sol ». Le fonctionnement (micro)biologique du sol va ensuite permettre l'incorporation de ces débris qui vont être « digérés » par minéralisation⁵, puis former des matières organiques de compositions et de durées de vie variables (demi-vies allant de quelques mois à quelques siècles, cf. annexe 4.1). La minéralisation de ces matières organiques et la « respiration » microbienne (phénomènes d'oxydoréduction) vont relâcher plus ou moins lentement le carbone, majoritairement sous forme de CO₂ dans l'air au dessus du sol. Par ailleurs, les racines actives « respirent », c'est à dire qu'elles utilisent de l'oxygène et qu'elles produisent du CO₂, qui va également être relâché dans l'air au dessus du sol. Cette respiration du sol ne se produit évidemment que lorsqu'il y a des racines vivantes (notamment sous les arbres).

Le relâchement de CO₂ à partir du sol constitue le phénomène d'émanation. L'intensité de l'émanation dépend du climat, de la saison des caractéristiques du sol et de la couverture végétale : l'émanation est d'autant plus intense

³ Le *zéro de végétation* est la température minimale nécessaire au démarrage de la croissance d'un végétal. Elle est de l'ordre de 5 à 10°C pour une grande variété de végétaux des climats tempérés et dépend de nombreux paramètres (espèces, variétés, hygrométrie, climat...).

⁴ En revanche, les racines excrètent en faibles quantités des petites molécules carbonées (poids moléculaire inférieur à 1000 Daltons) ou rhizodépôts : exsudats racinaires, mucilages...

⁵ La minéralisation consiste en la transformation du carbone des molécules organique en carbone minéral (CO₂, CH₄...).

que l'ensemble sol + végétal est biologiquement actif. Ce gaz va alors être dilué dans l'atmosphère et très partiellement réincorporé dans les végétaux par photosynthèse.

La figure 2 résume les grandes lignes de ce comportement.

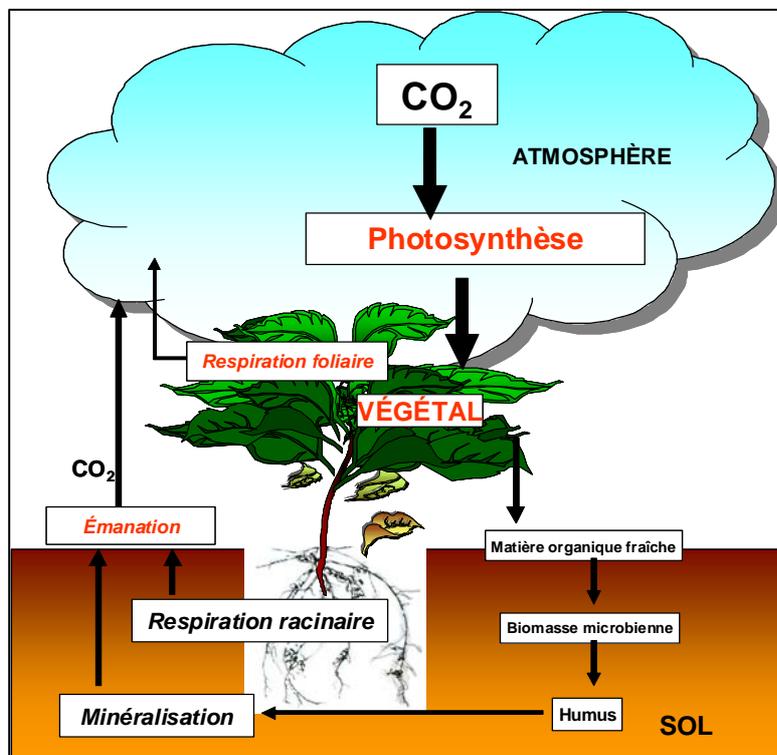


Figure 2. Schéma du cycle du carbone dans le système sol - plante - atmosphère.

1.3.1.2 Conséquences sur le comportement et l'évolution dans le temps du carbone 14 des végétaux

Rappelons que la période radioactive du carbone 14 est de 5 734 ans, en conséquence, à l'échelle de temps humaine, la diminution de l'activité du ¹⁴C par décroissance radioactive est insignifiante.

Lorsque les concentrations en ¹⁴C du CO₂ de l'atmosphère, à hauteur des parties aériennes des végétaux, sont peu variables autour d'une valeur moyenne, on considère et l'on constate par la mesure que l'activité spécifique (Bq ¹⁴C/kg carbone stable) du carbone organique des végétaux vivants est en équilibre avec celle du carbone du CO₂ de l'air ⁶. Lorsque se produit durant un certain temps une augmentation significative de l'activité spécifique de l'air, la matière organique des végétaux formée durant ce laps de temps se trouve enrichie en ¹⁴C.

Après le retour à une atmosphère normale, l'activité spécifique en ¹⁴C des organes végétaux, formés dans une atmosphère non enrichie en ¹⁴C, diminue pour rejoindre l'activité spécifique de l'air.

⁶ En négligeant la très légère discrimination isotopique, de quelques pour mille, du ¹⁴C par rapport au ¹²C et ¹³C qui se produit dans les tissus végétaux lors de la métabolisation du CO₂ provenant de l'atmosphère.

Selon les organes concernés et le type de végétal, cette diminution est plus ou moins rapide.

Tous les organes (aériens et souterrains) des végétaux annuels⁷ et les feuilles des végétaux caducs⁸, en particulier les feuilles d'arbres et d'arbustes, sont renouvelés chaque année. Lorsque les végétaux sont persistants⁹ (i.e., la plupart des résineux, notamment les pins, ainsi que le chêne vert, peu présent sur le Belvédère, les arbustes tels que le thym, romarin...), ce renouvellement du feuillage s'étale sur 3 à 4 ans et sur toute l'année. L'apparition de nouvelles feuilles est favorisée durant les périodes habituelles de croissance : printemps, été s'il n'est pas trop sec, parfois début d'automne s'il est doux. Ce phénomène aboutit ainsi à retarder le retour à une activité spécifique de l'ensemble du feuillage¹⁰ égale à celle de l'air, lorsque cette dernière est redevenue équivalente au bruit de fond. C'est le cas des échantillons prélevés en 2001 (aiguilles de pin, feuilles de troènes, thym, romarin, laurier...) qui contenaient des feuilles ayant été contaminées lors des derniers mois d'exploitation de l'usine et qui, de ce fait, présentaient des activités spécifiques encore élevées, cf. paragraphe 1.4.2.

En revanche, les parties ligneuses et le système racinaire qui ont été formées durant les phases de contamination et qui restent en place plusieurs années conservent la « signature » des contaminations passées. En particulier, l'activité spécifique du bois formé durant la période pendant laquelle l'entreprise Isotopchim rejetait du ¹⁴C est restée quasi-similaire à ce qui a pu être mesuré en 2001.

En tout état de cause, l'activité actuelle du bois ne peut être qu'inférieure ou égale à celle mesurée en 2001.

Tous les processus liés au fonctionnement du système sol-végétal aboutissent à diminuer légèrement cette activité spécifique ou bien, simplement, à retarder cette diminution, par des phénomènes assimilables à un « recyclage » comme vont l'expliquer les paragraphes qui suivent.

La « dilution » par un accroissement de biomasse totale du bois, liée à la croissance de bois non contaminé, formé depuis l'arrêt de l'installation, va légèrement diminuer l'activité spécifique moyenne des grumes. L'accroissement du bois depuis 2001 est néanmoins faible : la croissance moyenne¹¹ du bois sur des chênes adultes est de l'ordre de 0,5 % par an (Dhôte et al., 2000). L'accroissement de la biomasse du bois entre 2001 et 2009 serait ainsi de moins de 5 %. L'utilisation en 2009 des valeurs d'activité en ¹⁴C mesurées dans le bois en 2001 seraient donc un peu majorantes, d'environ 5 %, ce qui est négligeable eu égard à la variabilité des résultats de mesure (cf. paragraphe 1.4). Un autre phénomène (sur lequel nous n'avons pas trouvé de documentation) pourrait aussi conduire à une faible diminution de l'activité spécifique du bois : la translocation du ¹⁴C à partir du bois contaminé vers les feuilles qui sont éliminées après leur chute. Inversement, une faible migration de petites molécules organiques faisant partie de la matière vivante des racines vers le bois nouvellement formé (montée de sève) peut être envisageable, aboutissant ainsi à un léger recyclage du carbone au sein de l'arbre, sans augmentation de l'activité spécifique du bois « ancien ».

⁷ Végétaux annuels : qui meurent après une année.

⁸ Caducs : végétaux qui perdent toutes leurs feuilles à chaque automne mais qui conservent leurs racines et leurs tiges ligneuses.

⁹ Végétaux dont le feuillage persiste plusieurs années, jusqu'à des centaines d'années pour certains arbres.

¹⁰ Compte tenu de la présence simultanée de feuilles d'âges différents.

¹¹ Étude Engref-Inra sur 82 chênes âgés de 61 à 224 ans.

En ce qui concerne les organes végétaux formés depuis l'arrêt des rejets d'Isotopchim : nouvelles branches de faible diamètre feuilles et pousses racinaires, le processus de l'émanation à partir du sol vient freiner le retour à une activité spécifique en équilibre avec le bruit de fond ambiant. Ainsi, lorsque l'on se trouve directement sous les parties aériennes d'un végétal (et donc au dessus de sa masse racinaire), en particulier un arbre, le CO₂ émané est enrichi en carbone 14, par rapport à l'atmosphère alentours, du fait :

- d'une part, de la minéralisation du carbone organique des débris végétaux qui ont été contaminés durant la phase d'exploitation de l'usine et incorporés au sol, y compris les racines mortes, directement présentes dans le sol ;
- d'autre part de la respiration des racines qui ont aussi été contaminées antérieurement à l'arrêt des rejets d'Isotopchim.

Le CO₂ relâché du sol vers l'air situé au dessus de sa surface participe pour une faible part à la photosynthèse durant les phases de croissance du végétal (les publications font état d'une participation de l'ordre d'une dizaine de pourcents). Dans le cas des arbres, l'existence de ce phénomène, indépendamment de sa faible incidence, est certaine du fait de la masse importante de matière organique qu'ils ont pu générer et de la masse importante de racines préexistantes à l'arrêt des rejets. Cette émanation d'un CO₂ légèrement enrichi en ¹⁴C peut perdurer là où le sol n'est pas bitumé et uniquement durant les périodes d'activité biologique du sol (l'émanation d'un sol nu ou sec est quasi nulle) et des racines (la période hivernale, en particulier s'accompagne d'une quasi dormance des végétaux). Nous verrons au § 1.4.3 que ce phénomène est très probablement encore actif sous les grands arbres situés sur un sol non bétonné, qui avaient été très contaminés avant 2000. Il pourrait expliquer une rémanence du ¹⁴C visible sur les mesures d'échantillons actuels de litière, feuilles et branchettes.

Néanmoins, sur la majorité de la zone du Belvédère, l'enlèvement systématique des feuilles et débris végétaux depuis plusieurs années a probablement éliminé la majorité des apports au sol de matières organiques contaminées ; en ce qui concerne les zones situées autour du périmètre du Belvédère, elles n'ont été que très peu contaminées. Compte-tenu de la faible teneur en matière organique des sols locaux (1 % de carbone organique) et du fait que la matière organique participant à l'émanation provient en grande partie d'une période antérieure ¹² à l'exploitation de l'usine, l'importance et le niveau de contamination du flux émané sont probablement peu significatifs.

1.3.2 Voies d'exposition potentielles

Après avoir tenté de résumer les grandes lignes du comportement du ¹⁴C, indépendamment du risque associé à sa présence dans l'environnement, il convient de considérer les voies d'exposition potentielles qui peuvent en découler.

Le carbone 14 est un émetteur β^- de faible énergie — énergie moyenne : 5 keV, énergie maximale : 156,5 keV.

Pour une comparaison aisée des doses imputables aux voies d'atteinte potentielles, la figure 3 (dont la méthode d'obtention est détaillée en annexe 4.2) permet, pour des conditions standard de mode de vie (temps de présence, taux d'inhalation, ration alimentaire en carbone...), de visualiser la dose efficace pour chaque voie d'atteinte en fonction des activités spécifiques en carbone 14 de chacun des milieux concernés.

¹² Moins du quart de la matière organique fraîche est susceptible de donner lieu à une émanation à court terme, cf. annexe 4.1.

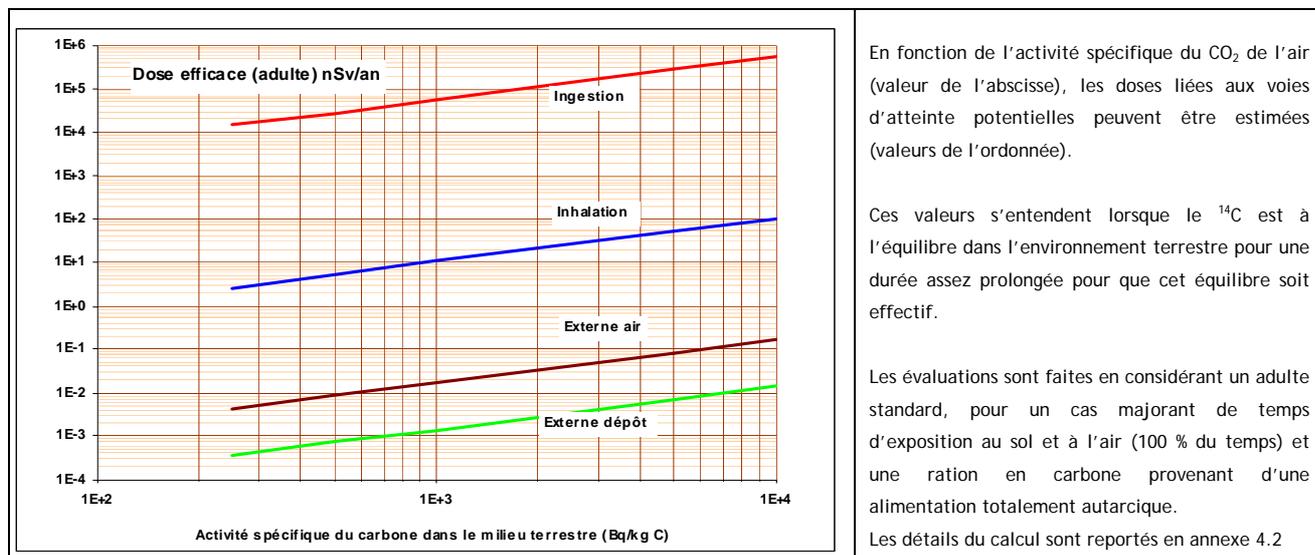


Figure 3. Comparaison schématique des valeurs de doses efficaces par les voies d'atteinte potentielle, en fonction de l'activité spécifique du ¹⁴C en milieu terrestre.

Ce schéma illustre les faits suivants :

- En raison de la faible énergie de son rayonnement, le carbone 14 n'occasionne **pas de dose significative par irradiation externe**. De ce fait, aucune voie d'atteinte externe n'est à prendre en compte, notamment pour ce qui concernerait le séjour sous ou à proximité des arbres contaminés ou le séjour sur le sol ou la végétation, ainsi que la manipulation des végétaux ou des bois contaminés.
- L'exposition interne par **inhalation** de carbone sous forme gazeuse (i.e., CO₂) est largement inférieure à la dose par ingestion : à activité spécifique du carbone équivalente dans le CO₂ de l'air et dans le carbone des denrées, l'inhalation induit une dose de l'ordre de 2 pour dix mille de la dose par ingestion.

Il convient de souligner que la dissémination massive dans l'air du ¹⁴C intégré à la végétation et particulièrement aux bois des arbres ne peut se produire que lors de la combustion de ces bois. La dose efficace par inhalation sera donc considérée dans le cas de l'exposition directe à des fumées de combustion et d'une exposition à l'air extérieur enrichi par ces fumées ; le cas particulier de l'inhalation liée à un séjour sous les arbres et imputable à l'émanation due à la respiration des racines sera également évoqué.

L'inhalation de fines particules de bois lors du sciage ou du broyage du bois ou l'inhalation de poussières provenant du sol ne sont pas susceptibles d'induire une dose, le carbone de ces particules n'étant pas sous une forme gazeuse.

- Le carbone peut être métabolisé dans un organisme animal (organisme humain notamment) essentiellement par l'ingestion de denrées. Comme nous l'avons vu précédemment, l'incorporation du ¹⁴C dans les végétaux passe par l'assimilation photosynthétique du CO₂ de l'air, exclusivement durant les phases de croissance du végétal. En l'absence d'une source atmosphérique ou durant le repos végétatif des végétaux, cette voie n'existe pas. Elle ne peut être considérée que s'il se produit une augmentation de l'activité spécifique du CO₂ de l'air durant la période de végétation (hiver exclu) et une consommation des végétaux ainsi contaminés. En

conséquence nous étudierons le cas d'une dissémination de carbone lié à un incendie estival induisant une contamination des végétaux suivie de leur ingestion.

1.3.3 Bruit de fond du carbone 14

On entend par bruit de fond du carbone 14 le niveau de radioactivité de cet isotope dans l'environnement en l'absence d'une source locale. L'expression usuelle de la radioactivité du carbone 14 est l'activité spécifique (Bq/kg C), valeur directement issue de sa mesure. L'expression du carbone 14 en activité massique est moins usitée car elle nécessite de faire intervenir des paramètres intermédiaires (e.g., concentration massique du carbone dans l'air, dans un végétal frais...) moins robustes et elle ne permet pas des comparaisons immédiates du niveau de contamination de différentes composantes du milieu.

Le bruit de fond du carbone 14 en milieu terrestre (CO₂ atmosphérique, végétaux et animaux terrestre) est actuellement de l'ordre de 240 ± 18 Bq/kg C, en diminution constante depuis la fin des essais atmosphériques et du fait de l'augmentation permanente du CO₂ de l'air provenant de combustibles fossiles dans lesquels le ¹⁴C a disparu par décroissance radioactive. Le bruit de fond moyen dans l'air est estimé ¹³ à 0,05 Bq ¹⁴C/m³ air (valeurs confirmée par des mesures du CEA autour du site de Cadarache).

La dose efficace pour l'adulte, due pour plus de 99 % à l'ingestion, qui résulte de ce bruit de fond est de l'ordre de 12 µSv/an (10⁻⁶ Sv/an) (Roussel-Debet, 2007).

1.4 Contamination en carbone 14 du site de Ganagobie

1.4.1 Limites de la représentativité des mesures

Les résultats de mesures présentés ont été obtenus par les étapes suivantes :

a) méthode oxidizer® ; mesures réalisées au Laboratoire de traitement des échantillons du Vésinet (STEME/LTE)

- séchage des échantillons par lyophilisation ;
- combustion en oxidizer® d'une très petite aliquote (0,1 g), libérant du CO₂ ;
- piégeage du CO₂ sur un absorbant ;
- mesure du ¹⁴C par scintillation ;
- mesure indépendante du carbone pour exprimer les résultats en Bq/kg de C.

Cette méthode ¹⁴ est sujette à de fortes incertitudes, non seulement métrologiques (15 à 30 %) du fait de l'appareillage utilisé mais surtout liées à la faible masse de la prise d'essai lorsque l'échantillon n'est pas parfaitement homogène, ce qui est notamment le cas des échantillons ligneux tels que les bois et les litières (partie supérieure du sol composé de feuilles et de débris végétaux non encore décomposés). Ceci explique la forte variabilité des résultats obtenus entre deux échantillons prélevés à quelques dizaines de cm de distance et

¹³ La proportion volumique du CO₂ dans l'atmosphère (m³CO₂.m⁻³ air) est en 2008 de l'ordre de 385×10^{-6} (Keeling et Whorf, 2001, ré-évalué en permanence par le Earth System Research Laboratory). La concentration du carbone dans le CO₂ (kg C.m⁻³CO₂) est estimée à partir de la masse molaire du carbone (12 g.mol⁻¹) et du volume molaire des gaz parfaits à la pression atmosphérique (22,4 l.mol⁻¹), soit environ 0,536 kg C.m⁻³ CO₂. Actuellement, la concentration du carbone dans l'air serait ainsi de l'ordre de 0,2 g C.m⁻³ air.

¹⁴ La méthode plus fine en termes de métrologie dite « synthèse du benzène » qui donne directement en une seule mesure le rapport ¹⁴C/C stable n'échappe pas à ce problème de représentativité de l'échantillon ; elle est réservée en outre à des laboratoires de mesure « bas bruit de fond », ce qui exclut d'y mesurer des échantillons contaminés.

celle signalée par le laboratoire de mesure lors des prises d'aliquotes d'un même échantillon. Cette méthode a été utilisée pour tous les échantillons (2001 et 2009).

b) méthode de « synthèse du benzène » ; mesures réalisées au Laboratoire mesure de la radioactivité dans l'environnement d'Orsay (STEME/LMRE)

- séchage des échantillons par lyophilisation ;
- combustion à 800 °C, et récupération du dioxyde de carbone CO₂ ;
- synthèse de benzène à partir du CO₂ ;
- mesure du ¹⁴C du benzène par scintillation (le rapport ¹⁴C/C est ainsi directement connu).

Cette méthode, plus fine en termes de métrologie, n'échappe pas au problème de représentativité de l'échantillon ; elle est réservée à des laboratoires de mesure « bas bruit de fond », ce qui exclut d'y mesurer des échantillons contaminés. Dans le cas présent, seuls ont été re-mesurés, à titre de vérification, les échantillons de feuilles prélevés en 2009 et dont l'activité, préalablement déterminée par la méthode oxidizer® a été jugée compatible avec les niveaux maximaux admissibles pour le laboratoire « bas bruit de fond ».

1.4.2 Rappel des résultats de mesure d'échantillons prélevés en 2001

Les résultats des mesures effectuées sur les échantillons de bois, de feuilles d'arbres et de sols prélevés en 2001 (Leprieur et al., 2001), sont schématiquement reportés sur la figure 4. Les activités spécifiques des bois d'arbres du Belvédère mesurées en 2001 varient entre 9 500 et 25 000 Bq/kg C pour une valeur « moyenne » de l'ordre de 15 000 Bq/kg C.

Comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, ces valeurs n'ont aucune raison d'avoir notablement évolué depuis 2001.

On peut estimer les activités présentes dans les bois, en déterminant approximativement le cubage de ces arbres

(y compris les branches du houppier) à partir d'une formulation simplifiée ⁽¹⁵⁾ :
$$V = f \times \pi \times \frac{d^2}{4} \times h$$

V	(m ³)	volume du bois
f	(-)	coefficient de forme : f = 0,4 à 0,5 pour les feuillus et f = 0,6 à 0,9 pour les résineux, ici pris égal à 0,9
d	(m)	diamètre de section de la tige à 1,30 m
h	(m)	hauteur du tronc

D'après les observations faites sur place (01/07/09), le diamètre moyen des chênes est estimé à 0,4 m pour une hauteur de 10 m. Il y a une soixantaine de chênes sur le parc et quelques arbres isolés (pin, chêne...). Le volume du bois serait d'environ 0,9 m³ par arbre, soit environ 1,3 stères par arbre (le stère tient compte des « vides » entre chaque bûche, on compte de l'ordre de 0,7 m³ de bois par stère, en moyenne). Le « bois sec 15 % » i.e., à 85 % de matière sèche a une densité de l'ordre de 1 et une teneur en carbone de 45 % (Carbofor, 2004). Un arbre (partie aérienne) contient grossièrement 400 kg de carbone.

¹⁵ Information recueillie auprès des formateurs en Gestion Forestière au Centre Forestier de la Bastide des Jourdans (Vaucluse), à quelques dizaines de km de Ganagobie.

En fonction des activités spécifiques mesurées en 2001 on peut estimer que le ^{14}C contenu dans un arbre est de l'ordre de 6 MBq de ^{14}C (4 à 10 MBq). Pour une soixantaine d'arbres, le stock total de ^{14}C (parties aériennes) serait de l'ordre de 360 MBq (240 à 600 MBq).

En ce qui concerne les sols, les valeurs relevées en 2001 varient entre 1500 et 66 000 Bq/kg C – on remarque, ici en particulier, la très forte variabilité des valeurs d'un point à un autre. Compte tenu des taux de carbone mesurés dans ces échantillons (8 à 13 %), et sachant que la région présente des sols dont la teneur en carbone organique n'excède pas 1 % (Base de données « analyses des terres » INRA), nous pouvons supposer que ces prélèvements comprenaient non seulement le sol au sens strict, mais aussi la litière, fortement contaminée puisqu'elle intégrait les débris végétaux des années d'exploitation de l'installation Isotopchim.

1.4.3 Résultats de mesure d'échantillons prélevés en 2009

En 2009, quelques échantillons ont été prélevés pour compléter chronologiquement les nombreuses mesures antérieures par quelques vérifications ponctuelles. Cinq prélèvements ont été faits aux points proches sous les vents dominants (numéros notés 3 et 3' sur le plan) : feuilles de chêne, branchettes de diamètre inférieur à 1 cm et litière, prélevée sur l'un des rares endroits où elle subsiste (figure 5).

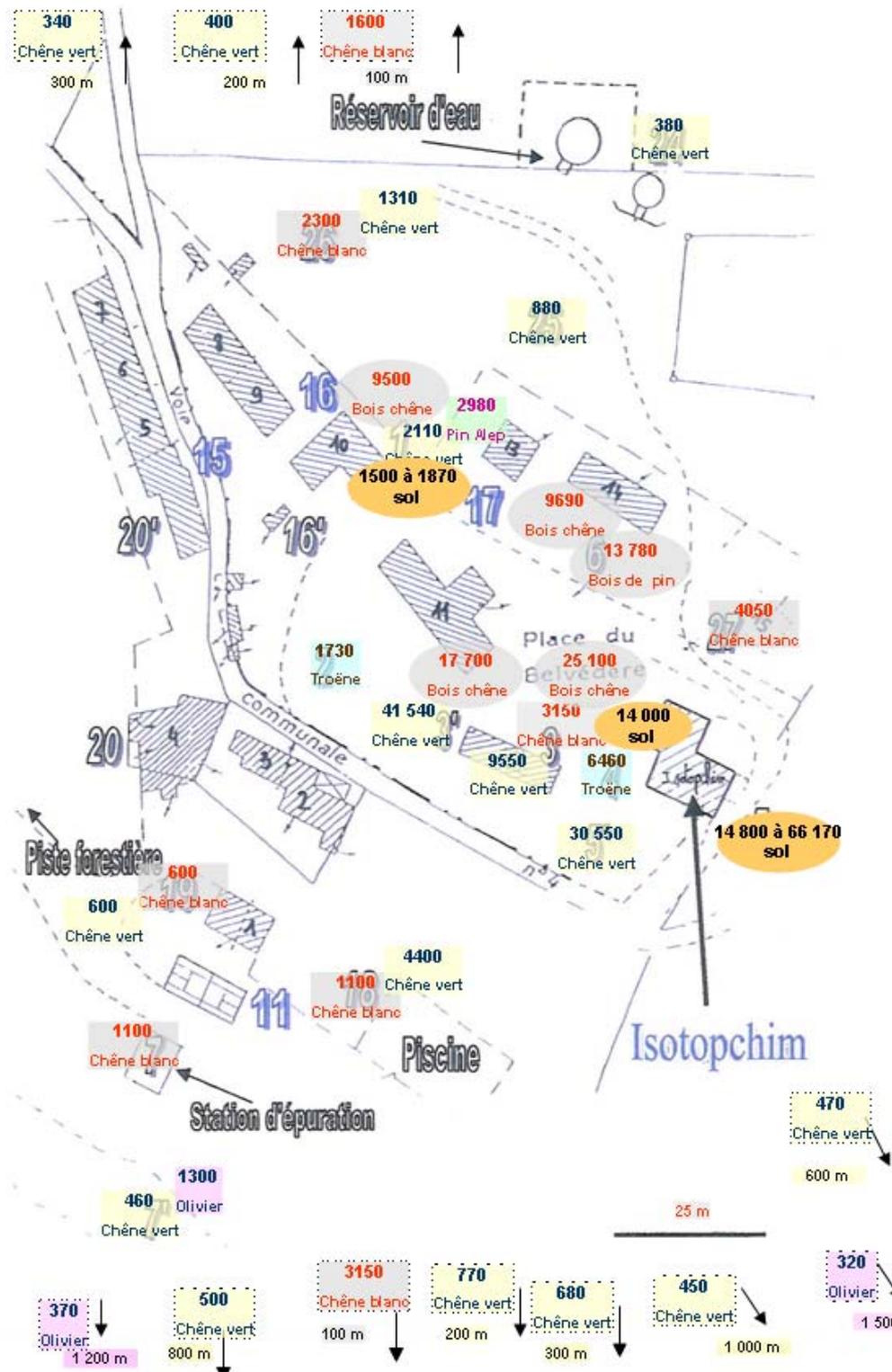
Les résultats (tableau 1) montrent que la litière reste relativement contaminée $11\,100 \pm 1900$ Bq/kg C, ce qui tend à confirmer le fait que cette litière s'est accumulée pour une majeure partie durant la période de fonctionnement de l'usine. Les branchettes dont l'âge est estimé être inférieur à une dizaine d'années ont des activités variant entre 2460 ± 420 et 4800 ± 820 Bq/kg C, plus faibles que les bois des troncs mesurés en 2001. Les activités des feuilles sont encore 6 fois plus élevées que le bruit de fond, puisqu'elles sont de l'ordre de 1500 Bq/kg C. Ces dernières valeurs ont été confirmées par un re-mesurage avec la méthode benzène.

Pour ces feuilles qui se sont formées après l'arrêt d'exploitation de l'usine et, dans une certaine mesure, pour les branchettes (dont on ignore l'âge exact et les proportions de matière organique récente ou ancienne), les activités spécifiques sont probablement imputables à un enrichissement local en CO_2 contaminé émané du sol : en effet, l'émanation du CO_2 par l'activité microbienne du sol et par la respiration du système racinaire (ainsi que, dans une moindre mesure, des branches et du tronc) de l'arbre peut continuer d'enrichir l'air dans lequel les feuilles se développent. Le système racinaire des arbres en question (sujets adultes de grande taille) a une envergure équivalente à celle de leur canopée et leur respiration racinaire s'exerce à partir de racines qui ont forcément conservé la trace des contaminations passées. Les conséquences de cette émanation seront considérées dans les scénarios étudiés.

Bq/kg C Bois	Activité spécifique du carbone dans le bois
Bq/kg C sol	Activité spécifique du carbone dans le sol (litière)
Bq/kg C Feuilles	Activité spécifique du carbone dans les feuilles
Bq/kg C Feuilles	Échantillon situé hors du périmètre de la carte

Figure 4. Résultats des mesures effectuées sur les échantillons de bois, de feuilles d'arbres et de sols prélevés en 2001 (Leprieur et al., 2001).

Valeurs arrondies. L'incertitude de mesure est de l'ordre de 10 %.



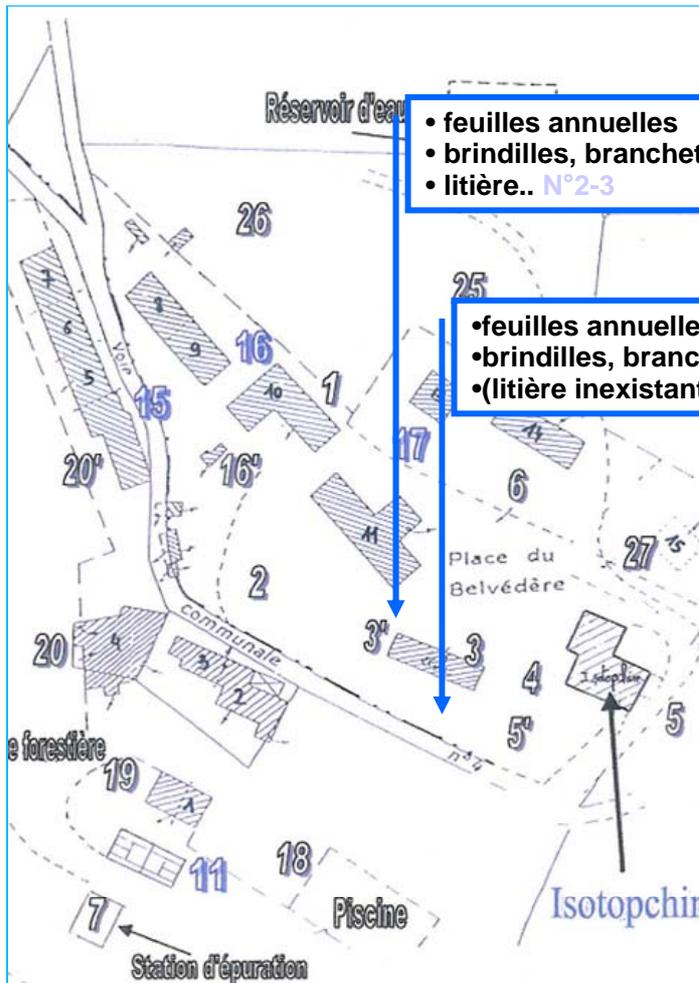


Figure 5. Localisation des prélèvements faits en 2009.

Tableau 1. Mesures effectuées sur le site en 2009 et comparaison avec les données antérieures.

Prélèvements* 2001 (Leprieur, 2001), Bq/kg C	Prélèvements 2009, Bq/kg C	
Feuilles (3) : 3 100 (chêne blanc) à 9 600 (chêne vert)	Feuilles chêne blanc (annuelles)	1 430 ± 270
Bois (3) : 9 550 (bois du tronc)	Branchettes (âge estimé : moins de 10 ans)	2 460 ± 420
Feuilles (3') : 41 000 (chêne vert)	Feuilles chêne blanc (annuelles)	1 650 ± 270
Bois (3') : 17 700 (bois- tronc d'arbre)	Branchettes (âge estimé : moins de 10 ans)	4 800 ± 820
« Sol » (3') : 14 000 (10 cm avec litière)	Litière (feuilles, glands, brindilles...) **	11 100 ± 1900

* Entre parenthèses, le numéro repère des échantillons, cf. carte ci-après.

** Échantillon particulièrement hétérogène ; valeurs très variables suivant la prise d'aliquote.

2 Examen des scénarios plausibles et conséquences

Plusieurs scénarios, associés aux options de gestion de la zone boisée, sont susceptibles d'induire un risque d'exposition par le biais d'une ou plusieurs voies d'atteinte aux personnes.

Dans le cas du maintien du site en l'état, les risques à examiner concernent l'incendie et secondairement les conséquences du brûlage en cheminée d'un arbre mort ou celles du compostage des feuilles et débris de débroussaillages périodiques.

Dans le cas d'une élimination du bois par coupe et brûlage, on se retrouve dans le cas de figure du brûlage d'un arbre, multiplié par le cubage éliminé. Les risques éventuellement liés à l'élimination des arbres par broyage et compostage seront également examinés.

Dans les deux cas, la persistance de la contamination du sol conduit à considérer également la possibilité d'ingestion par inadvertance de sol (scénario appliqué à l'enfant). De plus, sont examinées les conséquences en termes de dose par inhalation de la persistance du ^{14}C émané du sol, sous les arbres les plus contaminés.

2.1 Incendie des arbres du Belvédère

Un incendie limité à la zone boisée du Belvédère a une probabilité d'occurrence extrêmement faible. En effet, le Belvédère est particulièrement bien débroussaillé et est artificialisé sur la majeure partie de sa surface, avec des parkings, des voies bitumées, des sols recouverts de cailloutis, des jardins entretenus... Les espèces dominantes du parc sont des vieux chênes, naturellement peu inflammables dont les troncs ont des diamètres allant de 30 à 60 cm et dont les branches basses sont élaguées jusqu'à environ 2 m du sol. L'enlèvement très régulier des débris végétaux conduit à une totale absence de litière potentiellement combustible. L'incinération de cette seule zone pourrait résulter d'un acte malveillant particulièrement difficile à accomplir (mise à feu avec un combustible générant des flammes suffisamment hautes et durant assez longtemps pour que les feuilles puissent s'embraser...) ou bien d'un impact de foudre. Ce scénario est très peu probable, néanmoins ses conséquences sont évaluées ci-après.

Sont ensuite examinées les conséquences d'un incendie de grande ampleur du massif forestier alentours (moins improbable) qui pourrait éventuellement mettre à feu tout ou partie du site.

2.1.1 Évaluation sans prise en compte du massif forestier avoisinant

Pour estimer grossièrement l'impact d'un incendie limité à la zone du Belvédère, est calculée l'augmentation d'activité du ^{14}C de l'air qui en résulterait, puis l'augmentation théorique d'activité spécifique des végétaux qui auraient été impactés par cet accroissement momentané d'activité de l'air.

La modélisation de la dispersion atmosphérique d'un incendie de forêt ne peut pas être correctement appréhendée par les modèles opérationnels classiques (codes en usage à l'IRSN). Des modèles spécifiques existent ou sont en cours de développement (cf. notamment le programme de recherche européen EUFIRELAB¹⁶, en cours depuis 2003) mais ils concernent des échelles régionales ou continentales, nécessitent l'acquisition de nombreux paramètres spécifiques et demanderaient, pour être utilisable ici, des travaux d'adaptation et d'informatisation considérables et hors de proportion avec l'enjeu de la présente étude. Néanmoins, pour réaliser une estimation

¹⁶ EUFIRELAB, a wall-less Laboratory for Wildland Fire Sciences and Technologies in the Euro-Mediterranean Region. Documentation en ligne : eufirelab.org/deliverable.php.

chiffrée, l'IRSN a utilisé un code simplifié de dispersion "courte distance". Cet outil, employé dans cet objectif, permet d'estimer un majorant « enveloppe » des concentrations dans l'air qui résulteraient de l'émission totale du carbone 14 des arbres contaminés, comme s'il s'agissait d'une source ponctuelle au niveau du sol et sans tenir compte des effets thermiques et des conséquences qui en résultent ; c'est évidemment une approximation grossière et très majorante notamment du fait de l'élévation d'un panache d'incendie (au minimum plusieurs centaines de mètres, avec une modification substantielle des conditions de dispersion, voir photo).

Le calcul est détaillé en annexe 4.4, en considérant des conditions météorologiques compatibles avec un tel événement : sécheresse et fort vent (en l'occurrence ce type d'incendie se produit essentiellement en situation de sécheresse, par fort mistral, en été). Notons que par rapport aux approximations précédentes, l'incertitude relative au choix des conditions météorologiques et l'utilisation d'une modélisation basique à la place d'un modèle sophistiqué sont sans importance.



Panache de l'incendie de Saint Zacharie (Var) le 24 juillet 2006

Dans ces conditions, pour une source de 360 MBq de ^{14}C (valeur moyenne de l'activité totale des arbres, estimée au paragraphe 0), la concentration atmosphérique du ^{14}C serait au maximum de l'ordre de $0,1 \text{ Bq/m}^3$ en moyenne durant les 24 h qui suivraient le début de l'émission. Cela correspondrait à une augmentation durant 24 h de 200 % du bruit de fond de l'air. La dose par inhalation correspondante serait de l'ordre du nano-Sievert, en admettant que les personnes concernées restent sur place durant 24 h après le début de l'incendie (pompiers par exemple).

Si l'on considère que cet événement se produit, en outre, durant une période de croissance maximale des végétaux, pour ceux qui croissent le plus rapidement (i.e., de type légumes feuilles, avec un accroissement de masse rapide), la concentration finale du végétal récolté serait alors de 262 Bq/kg C (dont 22 Bq/kg C seraient imputables à l'incendie). Pour un individu adulte qui ingérerait 50 % de sa ration quotidienne en carbone par la consommation de ces végétaux durant 3 mois, l'augmentation de l'activité spécifique aboutirait à une augmentation de la dose efficace par ingestion de 170 nSv .

En réalité, d'une part l'occurrence des incendies violents est maximale de mi-juillet à fin août, période pendant laquelle la plupart des végétaux méditerranéens sont en arrêt de croissance (sécheresse et températures élevées). D'autre part, il est improbable qu'un individu se nourrisse exclusivement de végétaux d'origine locale tous récoltés ou produits au même endroit. Les hypothèses sous-jacentes sont donc pénalisantes.

2.1.2 Prise en compte du carbone lié au massif forestier

On peut supposer, ce qui est moins improbable, que l'incendie du Belvédère ait été provoqué par un incendie plus important du massif forestier avoisinant. L'ordre de grandeur supposé de cet événement est un feu d'une vingtaine d'hectares en quelques heures (ce qui est une faible superficie pour ce type d'événement). Dans ce cas,

le CO₂ enrichi en ¹⁴C à partir des arbres du Belvédère devrait se diluer très fortement dans le CO₂ non contaminé (i.e., dont l'activité spécifique est celle du bruit de fond) de l'incendie global, dans un rapport que l'on peut estimer très grossièrement au rapport des superficies concernées (environ 400 m² pour une vingtaine d'ha), soit environ un facteur 2×10^{-3} . Si l'on tient compte d'un tel facteur de « dilution », les augmentations d'activités spécifiques (air puis végétaux) et les doses imputables à l'événement seraient diminuées d'un facteur 500, aboutissant à une dose par ingestion inférieure à 1 nSv.

2.2 Brûlage par un particulier d'un ou plusieurs arbres provenant du Belvédère

Ce cas est envisageable, dans l'hypothèse de l'abattage d'un arbre (arbre mort) ou de l'élimination volontaire de tous les arbres du parc. Dans ce cas, un particulier (ou plusieurs) pourrait(ent) utiliser le bois pour leur chauffage. Lors d'une combustion en cheminée, on peut considérer (cf. annexe 4.3), qu'autour de 95 % à 98 % du bois sont brûlés (Collet, 2004) et donc que le carbone est dégazé majoritairement sous forme de CO₂, que le reste est constitué d'un mélange de cendres (2 % de la masse du bois sec) et d'une faible fraction de carbone imbrûlé (0 à 2 %) et que moins de 0,4 % de la masse initiale restent sous forme de suies¹⁷. On peut donc considérer que la quasi-totalité du ¹⁴C du bois se retrouve dans les fumées évacuées par la cheminée.

Compte-tenu de la saison de chauffage (habituellement en hiver) et de l'arrêt de végétation durant celle-ci, la combustion de ce bois ne devrait pas donner lieu à un quelconque renforcement de l'activité massique des végétaux en ¹⁴C.

Les voies d'exposition qui peuvent être raisonnablement examinées sont les suivantes :

- a) inhalation de l'air extérieur, comportant du CO₂ enrichi en ¹⁴C et émis par la cheminée ;
- b) inhalation des gaz émis dans l'habitation, en cas de mauvais tirage de la cheminée.

Pour ce qui concerne le premier cas, il est considéré que la personne en question va se chauffer à raison d'une vingtaine de stères sur 4 mois. L'estimation de l'activité moyenne du bois (cf. fin du paragraphe 1.2) permet d'estimer que l'activité dégagée par le brûlage du bois serait d'environ 0,8 MBq par 24 heures. On considère que la totalité du bois est consommé et aboutit à rejeter du CO₂, avec des conditions pénalisantes de vent faible et de mauvaise dispersion (calcul en annexe 4.5). La dose efficace par inhalation pour l'adulte, estimée dans les conditions majorantes d'une exposition chaque jour durant 8h par jour, à l'endroit le plus impacté, i.e. à moins de 500 m du rejet, serait alors de l'ordre de 0,05 nSv pour 4 mois de durée de chauffage.

En ce qui concerne l'inhalation de gaz émis dans l'habitation, est prise en compte une concentration de CO₂ ou de CO telle que soit atteinte la valeur moyenne d'exposition (VME), qui est la valeur-seuil qu'il ne faut pas dépasser sur une période de 8 heures, au risque d'une intoxication chronique (cela revient à comparer l'éventualité d'un détriment éventuel plusieurs années plus tard à une intoxication avérée immédiate, cf. annexe 4.6). Une concentration de CO₂ ou de CO telle que la VME soit atteinte se traduirait par les relations :

$1,7 \times 10^{-5}$ nSv/h par Bq¹⁴C/kg C sous forme de CO₂ ou $2,1 \times 10^{-8}$ nSv/h par Bq¹⁴C/kg C sous forme de CO.

Sur une durée de 8 heures, pour une activité spécifique du bois de 15 000 Bq/kg C, la dose efficace serait alors de 2 nSv pour du CO₂ (et 1000 fois moins pour du CO). Cette dose serait à multiplier par le nombre d'événements de

¹⁷ Ces données ont été complétées et confirmées par celles des essais de D. Piga, dans une installation DPAM, dans le cadre de sa thèse SESURE (cf. annexe 4.3).

cet ordre, dont il est raisonnable de penser qu'ils ne devraient pas se produire régulièrement, sous peine d'intoxication chronique des occupants.

2.3 Broyage ou compostage des débris végétaux du parc

L'entretien habituel du Belvédère se traduit par un broyage et un compostage des débris végétaux. Par ailleurs, il pourrait être décidé d'éliminer les arbres contaminés en les utilisant comme paillis¹⁸ après broyage. Dans les deux cas, l'utilisation du compost ou du paillis comme amendement ou protection pour des sols va susciter les processus de dégradation de la matière organique décrits en annexe 4.1. En particulier, l'incorporation au sol se traduit par une évolution du carbone vers des formes majoritairement de moins en moins labiles, susceptibles de relâcher peu à peu du carbone (et donc du carbone 14) sous forme de CO₂. L'émanation de CO₂ « enrichi » en ¹⁴C provient, dans ce cas, non pas de la respiration racinaire mais de l'activité microbienne affectant ces matières organiques ; elle peut donner lieu à un renforcement minime de l'activité spécifique de l'air au niveau du sol.

Dans le cas des débris actuels issus de l'entretien du parc, la dilution du carbone de ces débris (de moins en moins contaminés au fil du temps), par le carbone d'autres déchets non contaminés se traduit, en outre, par une diminution de leur activité spécifique. En effet, les volumes de déchets végétaux issus du parc représentent approximativement 30 tonnes/an alors que le total des déchets compostés est d'environ 1000 tonnes/an (rapports de volume). Si l'on considère que les déchets du parc ont une activité spécifique de l'ordre de 2000 Bq/kg C, valeur moyenne des feuilles et branchettes mesurées en 2009 au point le plus contaminé, l'activité spécifique du compost serait d'environ 290 Bq/kg C. Le compost peut être utilisé comme amendement, à une dose maximale¹⁹ de 2 %, ce qui aboutirait au final à un « enrichissement » négligeable de la matière organique du sol en ¹⁴C (valeur moyenne de 241 Bq/kg de C). Dans cette gamme de valeurs, de l'ordre du bruit de fond, les conséquences dosimétriques de l'inhalation liée à l'émanation du sol sont négligeables.

Dans le cas des arbres, l'épandage de paillis de bois broyé aboutirait à une rétention plus prolongée de la matière organique dans le sol, étant donné que les parties ligneuses des végétaux se décomposent beaucoup plus lentement que les feuillages. Le résultat dans ce cas serait un relâchement très différé, allant de plusieurs dizaines à quelques centaines d'années, du carbone contenu dans les bois, provoquant une augmentation diffuse, probablement faible de l'activité spécifique de l'air au dessus du sol où aurait été épandu ce paillis. Une évaluation chiffrée des conséquences de cet épandage n'est pas envisageable car elle nécessiterait des hypothèses, voire une modélisation, qui ne reposeraient sur aucune donnée crédible. Par ailleurs, envisager de broyer des gros volumes de bois, initialement sous forme de grumes de fort diamètre, est peu probable. Les conséquences de cette éventuelle pratique ne feront donc pas l'objet d'un développement plus élaboré.

2.4 Voies d'exposition potentielles imputables au sol

2.4.1 Ingestion involontaire de sol

L'évaluation de la dose liée à l'ingestion involontaire de sol est faite pour l'enfant de 1-2 ans, tranche d'âge la plus sensible et la plus susceptible d'ingérer du sol en jouant à l'extérieur. La dose par ingestion est calculée selon la formulation classique : activité ingérée × facteur de dose. Le facteur de dose pris en compte est de

¹⁸ Paillis : épandage en surface du sol d'une couche, d'environ 10 cm de hauteur, de déchets organiques.

¹⁹ Environ 5 kg/m². On tient compte de l'épaisseur (20 cm) et de la densité (1500 kg/m³ du sol concerné).

$1,6 \times 10^9$ Sv/Bq. L'activité ingérée est estimée à partir de la contamination maximale des sols (66 000 Bq/kg C, valeur maximale mesurée en un seul point en 2001, et une teneur en carbone de 2 %, ce qui est majorant ²⁰) et de la masse quotidienne ingérée en moyenne sur l'année : 100 mg/j (Navarro, 2008). Ainsi, aboutit-on à une dose efficace de l'ordre de 80 nSv/an.

2.4.2 Inhalation d'activité émanée du sol, sous les arbres

Il a été indiqué au paragraphe 1.4.3 que l'activité des feuilles des arbres les plus contaminés était actuellement à un niveau de l'ordre de 1500 Bq/kg C et que cette activité spécifique pouvait s'expliquer par une persistance de l'émanation du sol (micro-organismes et surtout respiration racinaire). En faisant l'hypothèse que l'activité spécifique du CO₂ de l'air sous ces arbres est égale à celle des feuilles, il est possible d'estimer une valeur majorante de la dose par inhalation liée au séjour sous la canopée de ces arbres. La formulation qui a été explicitée en annexe 4.2 permet le calcul direct de la dose efficace correspondante, soit : 16 nSv/an pour un adulte qui séjournerait 100 % de son temps sous l'un de ces arbres. Pour un temps de séjour « raisonnable » (5 % du temps), la dose résultante serait de 0,8 nSv/an ; elle serait encore plus faible, a fortiori, sous les arbres moins contaminés qui constituent l'essentiel du parc.

3 Récapitulatif des risques associés aux voies d'atteintes concevables et aux scénarios possibles et conclusion

À partir de considérations théoriques, d'observations in situ et de résultats de mesures, l'IRSN a estimé les impacts des deux options envisagées, en effectuant les calculs sur des bases majorantes. Le tableau 2 montre que les risques potentiels associés aux scénarios qui ont été envisagés en cas de maintien ou d'enlèvement des arbres sont soit infimes (irradiation externe, inhalation de particules), soit négligeables. En effet les doses estimées sont toutes inférieures à 100 nSv/an. Ces doses sont très inférieures à la dose imputable au bruit de fond du carbone 14 ($\approx 12\,000$ nSv/an) et, a fortiori, à la limite réglementaire admissible pour les personnes du public (1×10^6 nSv/an). Il convient de souligner que l'élimination des arbres n'apporterait qu'un « bénéfice » très relatif en termes de diminution de la contamination du site, étant donné que le sol et les systèmes racinaires en place resteraient contaminés. Les estimations montrent que l'enlèvement des arbres se traduirait par une diminution négligeable des doses par rapport à leur maintien en place, compte-tenu des scénarios plausibles associés à ces options. Le choix de l'une ou l'autre de ces options de gestion est donc une décision qui ne dépend pas d'un critère dosimétrique.

²⁰ En effet, une grande partie du carbone du sol est antérieur au fonctionnement de l'usine, donc non contaminé.

Tableau 2. Risques associés aux voies d'atteintes concevables et aux scénarios possibles.

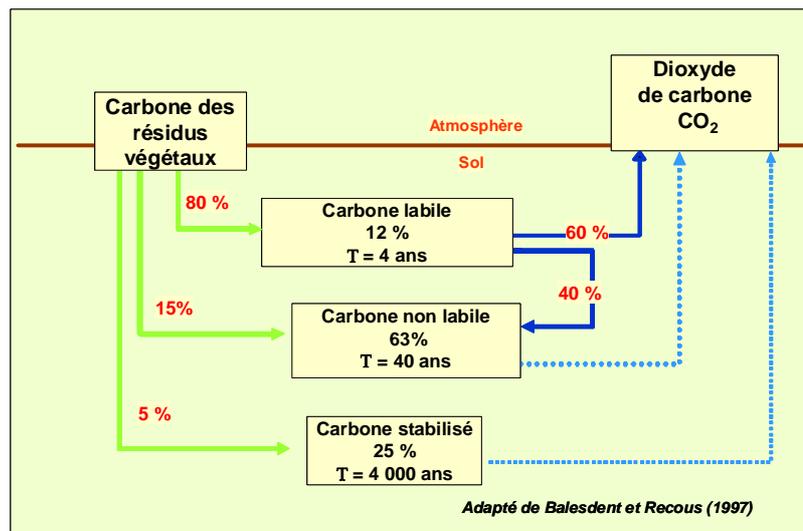
Nature de l'exposition	Voies potentielles d'atteinte	Impact dosimétrique maximum (<u>hypothèses les plus pénalisantes</u>)	Scénario dans lequel la voie peut intervenir (x)	
			maintien en l'état	élimination du bois
Irradiation externe	irradiation directe par la présence des arbres sur le site	dose infime - impact nul	x	
	irradiation externe directe par le sol (rémanence du ¹⁴ C dans la matière organique du sol)	dose infime - impact nul	x	x
	irradiation externe liée à manipulation des arbres (sciage, broyage...) ou des bûches et des débris végétaux (débranchage...)	dose infime - impact nul	x	x
	irradiation externe liée à la présence dans l'air extérieur d'une émanation issue de la rémanence du ¹⁴ C dans la matière organique du sol	dose infime - impact nul	x	x
	irradiation externe liée à la présence dans l'air extérieur d'une éventuelle émanation issue de l'apport au sol de déchets végétaux ramassés actuellement et compostés	dose infime - impact nul	x	x
	irradiation externe liée à la présence dans l'air extérieur d'une éventuelle émanation issue de l'apport au sol de bois broyé sous forme de compost	dose infime - impact nul		x compostage
inhalation	inhalation de poussières de bois, de végétaux ou de poussières de sol	dose infime - impact nul	x	x
	inhalation liée à la présence dans l'air extérieur d'une émanation issue de l'apport au sol de végétaux ou bois broyé puis utilisé comme paillage	dose infime - impact nul		x compostage
	inhalation du CO ₂ émané du sol et des racines (stationnement 5 % du temps sous les arbres les plus contaminés)	impact négligeable (< 0,8 nSv/an)	x	
	inhalation du CO ₂ provenant d'émanation issue de la rémanence du ¹⁴ C dans la matière organique du sol	dose infime - impact nul	x	x
	inhalation du CO ₂ dispersé à l'extérieur par une cheminée dans le cas du brûlage du bois des arbres du parc	impact négligeable (0,05 nSv en 120 jours de chauffage)	x	x brûlage
	inhalation du ¹⁴ C émané à l'intérieur de l'habitation dans le cas du brûlage d'un arbre avec une mauvaise combustion induisant une concentration de gaz (CO ou CO ₂) en limite de toxicité	impact négligeable (2 nSv : CO ₂ 0,002 nSv : CO)	x	x brûlage
	inhalation du CO ₂ dispersé à l'extérieur suite à un incendie local ou généralisé de la forêt	impact négligeable (< 1 nSv)	x incendie	
ingestion	ingestion du sol le plus contaminé par un enfant en bas âge (1-2 ans)	impact négligeable (80 nSv/an)	x	x
	ingestion durant 3 mois, à hauteur de 50 % du carbone alimentaire, de végétaux ayant subi durant leur période de croissance une élévation du ¹⁴ CO ₂ de l'air suite à un incendie généralisé de la forêt	impact négligeable (0,34 nSv avec « dilution » par la forêt)	x incendie	

Rappel : la dose efficace pour l'adulte imputable au bruit de fond du carbone 14 est de 12 000 nSv.

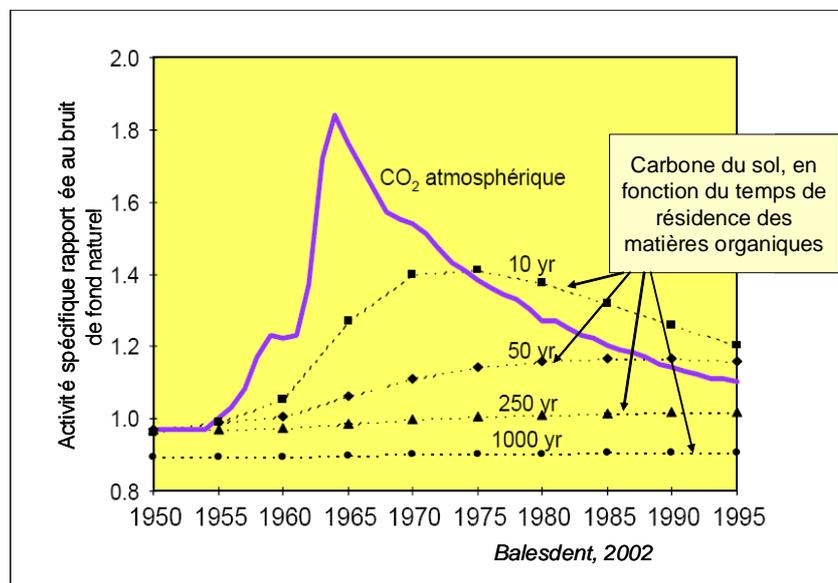
4 Annexes

4.1 Annexe 1. Émanation lié à l'évolution de la matière organique du sol

Le rythme de l'émanation est lié à celui d'une part de la respiration racinaire et d'autre part de la minéralisation des résidus organiques du sol qui s'effectue avec des temps de résidence (demi-vie biologique) allant de quelques mois à plusieurs siècles (cf. figure 6). L'intensité du flux émané dépend, entre autres, de la saison qui influe sur l'activité physiologique du végétal, du couvert végétal – dense ou clairsemé, des fluctuations de température et d'humidité qui jouent sur l'activité microbienne et celle du végétal, des apports de carbone (amendements organiques, résidus de culture, accumulation de la litière) ou, au contraire, des appauvrissements en carbone (exportations de la biomasse aérienne par récolte). Ce flux, qui varie d'une valeur nulle durant l'hiver, jusqu'à une valeur variable selon tous ces paramètres, serait, respectivement sur un sol de toundra et en milieu tropical de l'ordre de 60 à 1200 g C.m⁻².an⁻¹ (Maisongrande, 1996 ; Paul *et al.*, 1999 ; Aubinet, 2000) et participerait à la photosynthèse pour 10 à 20 %, sous une culture dense et peu élevée par rapport au sol tel qu'un champ de céréales en pleine croissance (e.g. Warembourg et Estelrich, 2000). Il dépend bien évidemment de l'apport au sol de débris végétaux (qui formeront les matières organiques). Lorsque se produit un enrichissement de l'atmosphère (donc des végétaux) en ¹⁴C durant une période suffisamment longue (quelques années, ce qui a été le cas ici), le résultat des échanges entre les différentes formes du carbone dans le sol, avec des cinétiques variables, se traduit par un accroissement de l'enrichissement du carbone du sol, donc du CO₂ émané. L'intensité relative, la cinétique et le retard par rapport au « pic » initial de ¹⁴C atmosphérique de cette réponse varient en fonction de différents facteurs agro-climatiques qui influent sur le temps moyen de renouvellement du carbone du sol (Balesdent, 2002). Il n'est pas envisageable (sinon au prix de mesures in situ disproportionnées, pour un résultat aléatoire et par rapport à un enjeu faible) de mesurer le flux de carbone et son activité spécifique, ni de quantifier le gradient vertical de ¹⁴CO₂ et la part de celui-ci dans l'incorporation du carbone dans le végétal.



a) Compartiments typiques intervenant dans le cycle de minéralisation-humification du carbone dans le sol



b) Réponse théorique de l'activité spécifique du carbone des matières organiques du sol à une variation de l'activité spécifique de l'air.

Ces figures montrent un exemple – parmi les très nombreux modèles qui sont développés – de paramètres et de résultats de simulation grâce auxquelles sont modélisés les temps de résidence (demi-vie) des fractions plus ou moins labiles (chimiquement instables) du carbone des matières organiques du sol.

Figure 6. Illustration du comportement des matières organiques du sol.

4.2 Annexe 2. Comparaison des différentes voies d'atteinte

Les facteurs de dose sont exprimés dans des unités diverses selon la voie d'atteinte, ce qui ne permet pas de quantifier directement l'importance relative de chacune d'entre elles. Pour ce faire, un calcul simplifié est proposé ci-après, permettant de relier directement la dose annuelle à l'activité spécifique du carbone des compartiments susceptibles de participer à l'exposition : air, mais aussi denrées et sol, supposés en équilibre avec l'activité spécifique du CO₂ de l'air. Cette estimation est volontairement basée sur des paramètres contextuels majorants (ration à 100 % en autarcie, temps de présence égal à 100 %).

La dose efficace par ingestion pour l'adulte peut être évaluée selon la formulation simplifiée²¹ de l'AIEA (2001) :

$$D_{\text{ing}} = g_{\text{ing}} \times f \times A$$

D_{ing}	Dose efficace engagée par ingestion pour l'adulte (Sv.an ⁻¹)
g_{ing}	Facteur de dose efficace « agrégé » (Sv.an ⁻¹ par Bq.g ⁻¹) pour l'adulte, égal à $5,6 \times 10^{-5}$ (AIEA, 2001)
f	fraction de carbone alimentaire provenant de la production locale (-), ici pris égal à 1
A	Activité spécifique de l'alimentation (Bq.g ⁻¹), prise ici égale à la valeur moyenne de l'activité spécifique du carbone dans le CO ₂ de l'atmosphère, à la conversion d'unité près, soit $1 \times 10^{-3} \times A_{\text{air}}$

Soit :

$$D_{\text{ing}} = 5,6 \times 10^{-8} \times A_{\text{air}}$$

La dose efficace par inhalation s'exprime selon l'équation :

$$D_{\text{inh}} = FD_{\text{inh}} \times T_{\text{inh}} \times A_{\text{CO}_2} \times A_{\text{air}}$$

D_{inh}	Dose efficace par inhalation (Sv.an ⁻¹)
FD_{inh}	Facteur de dose efficace par inhalation du carbone 14 sous forme de CO ₂ soit $6,2 \times 10^{-12}$ Sv.Bq ⁻¹ pour l'adulte et pour la forme CO ₂ (Euratom)
T_{inh}	Quantité moyenne annuelle inhalée par l'adulte (m ³ .an ⁻¹), soit 8 400 m ³ .an ⁻¹ (AIEA, 2001)
A_{CO_2}	Concentration (masse/volume) du carbone sous forme de CO ₂ dans l'air, estimée ²² à 2×10^{-4} kg C.m ⁻³ air
A_{air}	Activité spécifique du carbone dans le CO ₂ de l'atmosphère (Bq.kg ⁻¹ C)

Soit :

$$D_{\text{inh}} = 1,04 \times 10^{-11} \times A_{\text{air}}$$

²¹ Cette formulation correspond à une ingestion de carbone d'environ 265 g.j⁻¹ avec un facteur de dose $5,8 \times 10^{-10}$ Sv/Bq.

²² La proportion volumique du CO₂ dans l'atmosphère (m³CO₂.m⁻³ air) est en 2008 de l'ordre de 385×10^{-6} (Keeling et Whorf, 2001, ré-évalué en permanence par le Earth System Research Laboratory). La concentration du carbone dans le CO₂ (kg C.m⁻³CO₂) est estimée à partir de la masse molaire du carbone (12 g.mol⁻¹) et du volume molaire des gaz parfaits à la pression atmosphérique (22,4 l.mol⁻¹), soit environ 0,536 kg C.m⁻³ CO₂. Actuellement, la concentration du carbone dans l'air serait ainsi de l'ordre de 0,2 g C.m⁻³ air.

La dose efficace par irradiation externe due au sol s'exprime selon l'équation :

$$D_{\text{sol}} = FD_{\text{sol}} \times C_{\text{sol}} \times f$$

D_{inh}	Dose efficace par irradiation externe (Sv.an ⁻¹)
FD_{sol}	Facteur de dose efficace pour l'adulte, par irradiation externe due au sol (couche 0-1 cm), soit (3600 × 24 × 365) × (4 × 10 ⁻²³) Sv.an ⁻¹ par Bq.m ⁻³ pour l'adulte (valeur du Federal Guidance 12, compte tenu de la conversion d'unité en secondes par an)
C_{sol}	Activité volumique moyenne du ¹⁴ C du sol, estimée ²³ à : 13 × A _{air} (Bq.m ⁻³)
A_{air}	Activité spécifique du ¹⁴ C dans le CO ₂ de l'atmosphère (Bq.kg ⁻¹ C)
f	Proportion du temps de présence sur le sol, majoré à 1

Soit :

$$D_{\text{sol}} = 1,7 \times 10^{-14} \times A_{\text{air}}$$

La dose efficace par irradiation externe due à l'air contaminé (« panache ») s'exprime selon l'équation :

$$D_{\text{air}} = FD_{\text{air}} \times f \times A_{\text{CO}_2} \times A_{\text{air}}$$

D_{air}	Dose efficace par irradiation externe (Sv.an ⁻¹)
FD_{sol}	Facteur de dose efficace pour l'adulte, par irradiation externe due à l'air, soit (3600 × 24 × 365) × (2,24 × 10 ⁻¹⁹) Sv.an ⁻¹ par Bq.m ⁻³ pour l'adulte (valeur du Federal Guidance 12, compte tenu de la conversion d'unité en secondes par an)
f	Proportion du temps de présence dans l'air contaminé, majoré à 1
A_{CO_2}	Concentration (masse/volume) du carbone sous forme de CO ₂ dans l'air, estimée à 2 × 10 ⁻⁴ kg C.m ⁻³ air
A_{air}	Activité spécifique du ¹⁴ C dans le CO ₂ de l'atmosphère (Bq.kg ⁻¹ C)

Soit :

$$D_{\text{air}} = 1,4 \times 10^{-15} \times A_{\text{air}}$$

²³ L'activité volumique moyenne du ¹⁴C du sol qui participerait à l'irradiation externe est supposée provenir du carbone de la couche superficielle du sol et estimée à partir de la concentration du carbone dans le sol (de l'ordre de 2 % au plus dans ce type de sol), de l'activité spécifique du carbone du sol, supposée égale à celle du CO₂ de l'air, A_{air} (Bq.kg⁻¹) et de la densité du sol (1300 kg.m⁻³).

4.3 Annexe 3. Masses de carbone dégagées et résiduelles lors d'une combustion

4.3.1 Essais réalisés à l'IRSN

Une expérimentation a été réalisée dans une installation IRSN/DPAM pour évaluer le césium dégagé par les incendies de forêts, par D. Piga dans le cadre de sa thèse poursuivie au LERCM. Les données acquises lors des essais ont permis d'estimer les masses de carbone dégagées et résiduelles lors d'une combustion de bûches de taille « usuelle » dans un foyer normalement alimenté en air, à partir de 4 essais (tableau ci-après). Les masses de bois sec, de résidus et de suies (recueillies sur des filtres) et quelques hypothèses plausibles détaillées ci-après permettent de dresser un bilan du carbone et notamment de quantifier le carbone évacué sous forme de gaz, majoritairement sous forme de CO₂ (voire de CO...). Au vu des résultats, l'essai 3 a été écarté car le bois n'a quasiment pas brûlé.

	Bois initial	Résidu imbrûlé	Bois ayant brûlé ²⁴	Suies ²⁵
Masse (kg sec)				
essai 1	3.134	1.149	1.985	2.9E-03
essai 2	5.298	0.413	4.885	1.1E-02
essai 3	3.238	2.39	0.848	1.8E-03
essai 4	3.062	0.067	2.995	3.7E-03
Masse de carbone (kg C)		hypothèse ²⁶	hypothèse ²⁷	hypothèse ²⁸
essai 1	1.410	0.89325	0.499	2.9E-03
essai 2	2.384	2.19825	0.142	1.1E-02
essai 4	1.378	1.34775	0.003	3.7E-03

4.3.2 Essais réalisés par l'INERIS

l'INERIS a réalisé des essais de combustion de végétation du Sud-est et du Sud-ouest de la France en vue de mesurer les facteurs d'émission de polluants (hydrocarbures aromatiques polycycliques, composés organiques volatils, dioxines et furanes, etc.) lors des incendies forestiers. Nous donnons ici uniquement les résultats utiles à la présente étude, à savoir les masses chargées et brûlées concernant les essais « Sud-est ». Des échantillons constitués de litière, de végétaux spontanés, de feuilles de chêne, d'aiguilles de conifères, et de branchages de faible diamètre de diverses essences (chêne vert et kermès, pin) ont été prélevés en août 2003 dans les Bouches du Rhône. Les essais ont été effectués dans une chambre de 80 m³ et ont donné les résultats suivants :

Masse chargée (kg)	24.84	22.70
Masse brûlée (kg)	24.05	23.89
Masse brûlée / masse chargée (%)	91.2	96.4

²⁴ Valeur par différence des masses *bois initial* – *résidus*.

²⁵ Déduit des mesures sur filtres dans le conduit d'évacuation des fumées.

²⁶ Selon Carbofor (2004) la teneur en carbone est de 450 g de C par kg de bois dit « sec 15 % » (15 % d'humidité).

²⁷ En défalquant des imbrûlés une masse de cendres inorganiques (2 % de la masse du bois sec).

²⁸ En supposant que les filtres recueillent du carbone pur.

4.4 Annexe 4. Conséquences d'un rejet atmosphérique durant un incendie de forêt

Compte tenu des spécificités d'un incendie, et en l'absence d'un code opérationnel idoine, nous utilisons le code SIROCO (Montfort, 1999), pour une évaluation majorante, destinée à fournir une valeur enveloppe des concentrations dans l'air au point d'impact maximal.

Les conditions retenues pour le calcul de la dispersion atmosphérique par sont les suivantes :

- Vitesse du vent : 20 m/s (72 km/h)
- Facteur de battement de vent : 3
- Conditions de diffusion normales
- Émission durant 12 heures
- Taux d'émission : 360 MBq soit environ 8300 Bq/s (durant 12 h)
- Hauteur de rejet prise en compte : 10 m (hauteur moyenne de la canopée)
- Durée d'observation : 24 h (à partir du début du « rejet »).

Les résultats obtenus au point d'impact maximal sont les suivants :

Activité ajoutée intégrée dans l'air, 24 h après le début du rejet (Bq.s/m ³)	Activité volumique moyenne ajoutée durant 24 h (Bq/m ³)	Dose efficace par inhalation pour l'adulte pour 24 h de présence (Sv)
9000	0,1	$0,14 \times 10^{-8}$

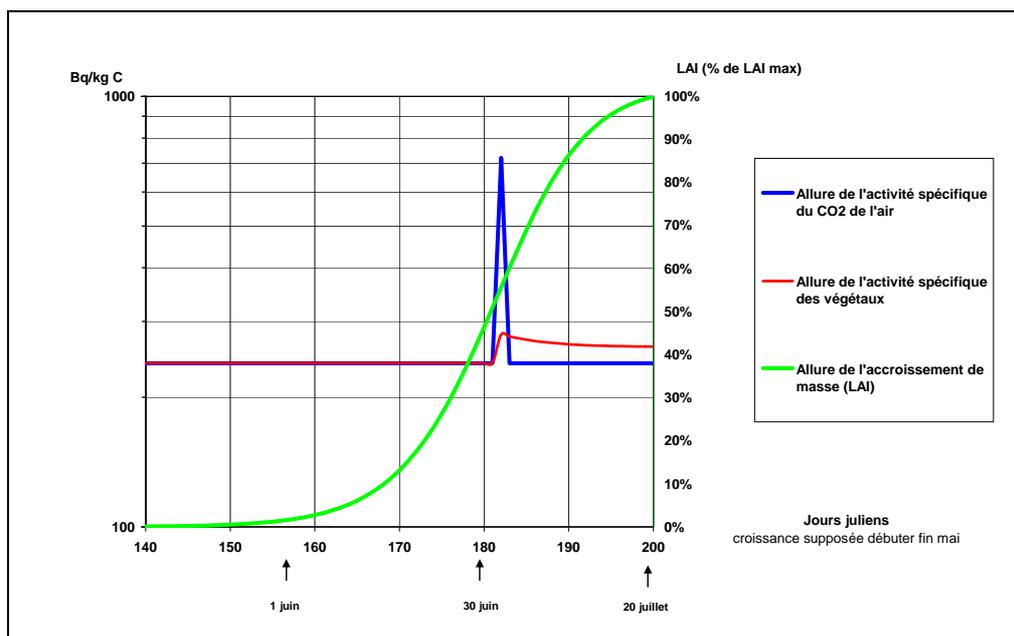
Le bruit de fond actuel est de l'ordre de 0,05 Bq/m³ (pour une activité spécifique du CO₂ de l'air de 240 Bq/kg C) L'activité spécifique du CO₂ de l'air subirait une augmentation temporaire de $240 \times (0,1/0,05)$, soit + 480 Bq/kg C (+ 200 %).

Il est possible d'évaluer l'activité spécifique des végétaux qui en résulte.

Les conséquences d'un rejet de durée limitée sur la proportion de carbone (donc de ¹⁴C) incorporée dépendent directement du stade de développement de la plante concomitant à ce rejet. La figure 7 illustre, à titre d'exemple, cet effet, en représentant :

- d'une part une courbe typique de croissance de la matière végétale. Il s'agit en réalité de l'indice de surface foliaire LAI (m²/m²) des légumes-feuille, pris ici comme exemple, en pourcent du LAI atteint à maturité. On fait l'hypothèse, habituellement admise bien qu'approximative, que la quantité de matière sèche — donc de matière organique et de carbone — est proportionnelle au LAI (*courbe figurée en vert, échelle de droite*) ;
- d'autre part, les activités spécifiques :
 - du CO₂ de l'atmosphère, qui présente une augmentation brutale pendant le rejet considéré (*courbe figurée en bleu, échelle de gauche*);
 - du végétal concerné, supposé se trouver en pleine croissance durant cette période (*courbe figurée en rouge, échelle de gauche*).

Pour un légume-feuille, en pleine croissance, ce qui représente un cas majorant, plus de 95 % de la biomasse aérienne sont formés en présence d'une activité de l'air égale au bruit de fond (240 Bq/kg C) alors que 4,6 % au plus sont formés en présence d'une activité spécifique augmentée (240 + 480 Bq/kg C), durant 24 heures. Dans ce cas, si le végétal est récolté à maturité, son activité spécifique moyenne est de 262 Bq/kg C, soit une activité spécifique ajoutée de 22 Bq/kg C.



Évolution théorique simultanée de l'accroissement de masse (en vert) et de l'activité spécifique en carbone 14 du végétal (en rouge) lorsque se produit une augmentation de durée limitée de l'activité spécifique de l'air en carbone 14 (en bleu).

Figure 7. Illustration d'une courbe de croissance des végétaux couplée à la représentation de la variation de l'activité de l'air et des végétaux.

Une estimation de l'accroissement de la dose efficace peut être faite pour cette augmentation de l'activité spécifique de + 22 Bq/kg C. Cette estimation concerne un individu adulte consommant durant 3 mois une nourriture dont le carbone serait issu à 50 % de la zone influencée (en excluant, par exemple, les produits céréaliers, le sucre et les huiles, denrées supposées ne pas être d'origine locale ²⁹).

L'accroissement de la dose efficace à l'adulte par ingestion, est égale à :

$$D = FD \times Rc \times A$$

- D Dose efficace par ingestion pour l'adulte (Sv).
- FD Facteur de dose efficace par ingestion du carbone 14, égal à $5,8 \times 10^{-10}$ Sv/Bq.
- Rc Masse de carbone ingérée durant la période (kg), soit 13,5 kg en 90 jours, en se basant sur 50 % de la consommation standard de la CIPR de 300 g de C par jour pour la totalité des denrées ingérées
- A Activité spécifique ajoutée en moyenne dans les denrées, ici prise égale à 22 Bq/kg C.

Pour les conditions décrites ci-dessus, majorantes en termes de consommation alimentaire de carbone d'origine locale, l'augmentation de la dose efficace par ingestion serait de 170 nSv.

²⁹ La contribution moyenne des aliments à l'ingestion de carbone, pour l'adulte, est la suivante, en % de la ration en carbone :

Huile végétale, beurre, sucre	22
Céréales	25
Lait et fromages	13
Fruits, légumes	15
Viandes, poissons, œufs	25

4.5 Annexe 5. Conséquences de l'inhalation de fumées à l'extérieur du logement

L'estimation de l'activité et du cubage du bois (§ 1.2) est rappelée : un arbre représente environ 1,3 stère et 6 MBq. L'utilisation de 20 stères en 4 mois (120 jours) représente 92 MBq soit un taux d'émission d'environ 9 Bq/s.

On considère un rejet dans des conditions de vent faible (5 m/s), une diffusion faible et une hauteur de rejet (cheminée) de 10 m. Le calcul est effectué avec le code SIROCO en considérant que le rejet durant 120 jours est la somme de 120 rejets unitaires journaliers. Dans ces conditions, le point d'impact maximal est situé à moins de 1 km, dans l'axe du vent et aboutit à des doses efficaces pour l'adulte, exposé 100 % du temps, comme suit :

	Panache	Inhalation	Total sur 120 jours
Sv/jour	$1,72 \times 10^{-18}$	$1,15 \times 10^{-12}$	
en 120 jours	$2,07 \times 10^{-16}$	$1,37 \times 10^{-10}$	0,14 nSv

La dose externe liée au panache est totalement négligeable par rapport à celle par inhalation, comme attendu. Ces valeurs sont majorantes car le vent est supposé faible, orienté toujours dans la même direction, avec de mauvaises conditions de dispersion et l'individu est supposé rester en permanence (i.e., jour et nuit) dans cette atmosphère, à l'extérieur de son logement. Pour un temps de présence à l'extérieur de 8 h/j (soit 30 % du temps), ce qui est encore majorant mais non impossible, dans le cas d'un forestier par exemple, ces doses sont réduites d'un facteur 0,33, soit une dose cumulée en 120 jours de 0,05 nSv.

4.6 Annexe 6. Comparaison de la radiotoxicité du carbone 14 et de la toxicité chimique de l'oxyde et du dioxyde de carbone

Pour comparer la radiotoxicité du ^{14}C et la toxicité chimique du CO ou du CO_2 , la relation entre la dose efficace horaire par inhalation (Sv/h) et l'activité spécifique du carbone de chacun de ces gaz (Bq/kg C) est estimée en considérant que la valeur minimale de concentration de chacun d'entre eux, aboutissant à une exposition chimiquement toxique, est atteinte. Pratiquement, à partir de cette concentration limite (ppm, volumique), est calculée la dose efficace par inhalation durant 1 h d'un air à cette concentration.

Dose efficace par inhalation de ^{14}C comparée à la toxicité chimique du CO_2

$$D_{\text{inh}} = FD_{\text{inh}} \times C_{\text{air}} \times T_{\text{inh}}$$

D_{inh}	Dose efficace par inhalation ($\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$)	
FD_{inh}	Facteur de dose efficace pour l'adulte par inhalation du carbone 14 sous forme de CO_2 ($\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$)	$6,2 \times 10^{-12}$ (Euratom, 1996)
T_{inh}	Quantité moyenne annuelle inhalée par l'adulte ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	$1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (AIEA, 2001)
C_{air}	Activité volumique en ^{14}C de l'atmosphère ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ air)	$C_{\text{air}} = F_{\text{air}} \times C_{\text{CO}_2} \times A_{\text{Air}}$
f_{air}	Proportion (volume/volume) du CO_2 dans l'air ($\text{m}^3 \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-3}$ air)	$5 \cdot 10^{-3}$ (VME du CO_2 selon *)
C_{CO_2}	Concentration (masse/volume) du carbone dans le CO_2 ($\text{kg C} \cdot \text{m}^{-3} \text{CO}_2$)	$0,5357 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-3} \text{CO}_2$ (**)
A_{Air}	Activité spécifique du carbone dans l'atmosphère ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1} \text{C}$)	

* VME : valeur moyenne d'exposition (locaux professionnels) : 5000 ppm. C'est la valeur-seuil qu'il ne faut pas dépasser sur une période de 8 heures, au risque d'une intoxication chronique (directive 91/322/CE). Il n'existe pas de valeur limite « aiguë » en France. Au Royaume Uni, la valeur de « pic momentané » maximal en exposition professionnelle est de 15 000 ppm sur 10 minutes. Selon Louis et al. 1999.

** La concentration du carbone dans le CO_2 ($\text{kg C} \cdot \text{m}^{-3} \text{CO}_2$) est estimée à partir de la masse molaire du carbone ($12 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$) et du volume molaire des gaz parfaits à la pression atmosphérique ($22,4 \text{ l} \cdot \text{mol}^{-1}$), soit environ $0,5357 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-3} \text{CO}_2$.

ce qui aboutit à la relation : $1,7 \times 10^{-5} \text{ nSv/h}$ par $\text{Bq}^{14}\text{C}/\text{kg C}$ sous forme de CO_2 .

Dose efficace par inhalation de ^{14}C comparée à la toxicité chimique du CO

Le même calcul est fait en utilisant la VME du CO : $5 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{CO}/\text{m}^3$ air (50 ppm, selon la Fiche toxicologique 47, 116 de l'INRS) et le facteur de dose efficace pour l'inhalation du carbone 14 sous forme de CO ($8,0 \times 10^{-13} \text{ Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$) ce qui aboutit à la relation : $2,1 \times 10^{-8} \text{ nSv/h}$ par $\text{Bq}^{14}\text{C}/\text{kg C}$ sous forme de CO.

4.7 Annexe 7. Estimation de l'activité spécifique des composts issus du parc

Selon le rapport Cordif (1997), la densité des déchets verts, hors tontes de gazon, varie de 100 à 150 kg/m³ :

Type de déchets	kg/m ³
feuilles mortes	150
élagages d'été	110
élagages d'hiver et tailles d'arbres isolés	100

En ce qui concerne les déchets issus de l'entretien du parc, l'IRSN considère une valeur de 140 kg/m³. L'estimation de la masse de ces déchets tient compte de 10 camions de 20 m³ par an, soit un volume annuel de 200 m³ pour une masse de 28 tonnes/an ; le tonnage total reçu par la déchèterie est d'au moins 1000 t/an (valeurs 2008), avec une activité spécifique considérée comme égale à celle du bruit de fond : 240 Bq/kg C. L'activité spécifique des déchets du parc est estimée de façon majorante à partir des mesures de 2009 sur les feuilles et branchettes, au point le plus contaminé, à 2000 Bq/kg C.

L'activité spécifique moyenne du compost fabriqué avec le mélange de ces déchets est donc de : $(28 \times 2000 + 972 \times 240)/1000$, soit 290 Bq/kg C.

5 Références

- AIEA (2001). *Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment*. Agence Internationale de l'Énergie Atomique, Safety series n° 19.
- Aubinet M. (2000). Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. *Advances in Ecological Research*, 30: 114-175.
- Balesdent J., Recous S. (1997). Les temps de résidence du carbone et le potentiel de stockage de carbone dans quelques sols cultivés français. *Canadian Journal of Soil Science*, 77: 187-193.
- Balesdent J. (2002). Cycle et temps de résidence du carbone dans les écosystèmes terrestres, approches isotopiques. Travaux présentés à la SFRP, Paris, le 18/04/02.
- CARBOFOR (2004). Inra. Rapport final. Programme GICC 2001 "Gestion des impacts du changement climatique" juin 2004. Convention Gip ECOFOR n° 3/2001. *Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles*.
- Collet S. (2004). *Facteurs d'émission de polluants de feux simulés de forêt et de décharge*. Rapport- Inéris-Ademe, nov. 2004.
- CORDIF (1997). *Synthèses des connaissances sur les déchets végétaux d'Ile de France*. Synthèse des études de l'institut d'Aménagement et d'urbanisme de la Région d'Ile de France (IAURIF) et de l'ADEME. ISBN 2-7371-1206-0.
- Dhôte J.F., Hatsch E., Rittié D. (2000). Forme de la tige, tarifs de cubage et ventilation de la production en volume chez le chêne sessile. *Annals of Forest Sciences*, 57 : 121-141.
- Louis F., Guez M., Le Bacle C. (1999). Intoxication par inhalation de dioxyde de carbone. *Documents pour le médecin du travail* INRS : TC 74, N° 79 : 179-194.
- Eckerman K.F., Ryman J.C. (1993) Federal Guidance Report no. 12 *External exposure to radionuclides in air, water, and soil*. EPA-402-R-93-081.
- Euratom (1996). Directive 96/29/Euratom du Conseil du 13 mai 1996, fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers des rayonnements ionisants. *Journal officiel des Communautés européennes*, 29 juin 1996.
- Keeling C.D., Whorf T.P. (2001). *Atmospheric Carbon Dioxide Record from Mauna*. In Trends Online: a Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, at cdiac.esd.ornl.gov. Scripps Institution of Oceanography (SIO) University of California, La Jolla, California, USA.
- Leprieur F., Linden G., Pasquier J., 2001. *Impact radiologique et sanitaire de la contamination par le carbone 14 du site de Ganagobie (Provence, France)*. Rapport OPRI-SIS-2001 (résumé dans *Radioprotection*, 2003, 38, 13-28).
- Maisongrande P. (1996). *Modélisation du cycle du carbone dans la biosphère terrestre. Intégration de données satellitaires*. Thèse Physique et chimie de l'environnement INPT Toulouse, Centre d'Études Spatiales de la Biosphère (23 février 1996).
- Montfort M. (1999). *Présentation du modèle de dispersion atmosphérique du code SIROCCO_CD*. Note Technique IPSN- DPEA- SECRI- 99-121 - révision 1.
- Navarro E. (2008) *Modélisation de l'ingestion involontaire*. Détermination des paramètres nécessaires au calcul. Rapport IRSN/DEI/SESUC 2008-99.
- Paul E.A., Suchlthess H.U., Robertson G.P. (1999). Evolution of CO₂ and soil carbon dynamics in biologically managed row-crop agroecosystems. *Applied soil ecology* 11: 53-65.
- Roussel-Debet S. (2001). *Carbone 14 - Rôle des microorganismes sur le comportement de divers éléments dans le système sol - plante*. Rapport IPSN/DPRE/SERLAB- 2001-09.
- Roussel-Debet S. (2007). Evaluation of ¹⁴C doses since the end of the 1950's in metropolitan France. *Radioprotection* 42 (3) : 297-313.
- Roussel-Debet S. (2008). *Interprétation des résultats des mesures de carbone 14 réalisées sur des échantillons végétaux prélevés dans l'environnement de l'usine SOCATRI en juillet et août 2008*. Rapport IRSN/DEI/SESURE 2008-52.
- Warembourg FR, Estelrich HD (2000). Towards a better understanding of carbon flow in the rhizosphere: a time-dependent approach using carbon-14. *Biology and Fertility of Soils* 30(5/6): 528-534.

6 Illustrations : photos du site (juillet 2009)





Sud du petit Parc



Labo Isotopchim vu de la route du château d'eau



Discussion au Château d'eau avec l'employé municipal chargé du débroussaillage (Isotopchim à 100 m en contrebas à droite)