

IRSN

INSTITUT
DE RADIOPROTECTION
ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Faire avancer la sûreté nucléaire

Constat radiologique régional « Vallée du Rhône » État d'avancement et résultats acquis fin 2010

DEI/SESURE/2011-02

DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET DE
L'INTERVENTION

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

Demandeur	PMLT
N° action/Processus de rattachement	R3 -1-1-2

Constat radiologique régional « Vallée du Rhône »

État d'avancement et résultats acquis fin 2010

S. Roussel-Debet, L. Saey, D. Mourier

Laboratoire d'études radioécologiques en milieux continental et marin

Avec la collaboration technique du Laboratoire de Mesure de la Radioactivité dans
l'Environnement

DEI/SESURE/2011-02

	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	16/03/2011	16/03/2011	29/04/11	13/05/11	
Signatures					

DIFFUSION : Libre Interne Limitée

SOMMAIRE

1 INTRODUCTION	8
1.1 RAPPEL SUCCINCT DU CONTEXTE, DES OBJECTIFS ET DU CONTENU DE L'ETUDE.	8
1.2 DEROULEMENT DE L'ETUDE	9
1.3 RAPPEL DE LA STRATEGIE GENERALE DE PRELEVEMENTS ET DE MESURES EN MILIEU TERRESTRE	10
2 ÉTAT D'AVANCEMENT DES PRELEVEMENTS ET DES MESURES EN MILIEU TERRESTRE	12
2.1 DEFINITION DES ZONES DE PRELEVEMENT	12
2.2 PRELEVEMENTS DE DENREES	13
2.2.1 PLAN DE PRELEVEMENT ET DE MESURES DES DENREES	13
2.2.2 ÉTAT D'AVANCEMENT CONCERNANT LES DENREES	15
2.3 PLAN DE PRELEVEMENTS D'ECHANTILLONS DESTINES A MESURER LE TRITIUM (³H) ET LE CARBONE 14 (¹⁴C), HORS DE LA ZONE INFLUENCEE PAR MARCOULE.	15
2.4 CAS PARTICULIER DES SABLES DE CAMARGUE	15
2.5 PLAN DE PRELEVEMENTS SPECIFIQUES AU SITE DE MARCOULE	16
2.5.1 TRITIUM ET CARBONE 14	16
2.5.2 REMANENCE DES EMETTEURS ALPHA AU VOISINAGE DU SITE DE MARCOULE	16
2.5.3 RIZ ET SOL DE CAMARGUE	17
3 RESULTATS OBTENUS EN 2010	18
3.1 LE TRITIUM DANS L'ENVIRONNEMENT DU SITE DE MARCOULE	18
3.1.1 RAPPEL DES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DU TRITIUM	18
3.1.2 VALEURS MESUREES EN 2009 ET 2010	19
3.1.3 CONCLUSIONS CONCERNANT LE TRITIUM	27
3.2 CARBONE 14	28
3.2.2 ÉTUDE PARTICULIERE DES SOLS ET DES BIO-INDICATEURS AU VOISINAGE DE MARCOULE.	31
3.3 AUTRES RESULTATS ACQUIS SUR LA PARTIE AVAL DE LA VALLEE DU RHONE	44
3.3.1 SABLES DE CAMARGUE	44
3.3.2 RIZ ET SOL DE CAMARGUE	45
4 CONCLUSION	49

5 REFERENCES	50
6 ANNEXES	52
6.1 ANNEXE 1. DONNEES INAO PAR ZONE ET PAR COMMUNES.	52
6.2 ANNEXE 2. SYNTHESE DES DONNEES AGRESTE 2000 PAR ZONE ET PAR COMMUNES SUR L'ENSEMBLE DES COMMUNES ETUDIEES	54
6.3 ANNEXE 3. SITES INTERNET CONSULTES POUR CONSTITUER LA LISTE DES CONTACTS PREALABLES AUX MISSIONS DE TERRAIN	55
6.4 ANNEXE 4. CALENDRIER DES PERIODES DE PRELEVEMENT	55
6.5 ANNEXE 5. ÉTAT D'AVANCEMENT (DECEMBRE 2010) DU PLAN DE PRELEVEMENTS ET DE MESURES DE DENREES	56
6.6 ANNEXE 6. DONNEES METEOROLOGIQUES RELATIVES AU SITE DE MARCOULE (STATION : CHUSCLAN)	58

TABLEAUX

<i>Tableau 1. Calendrier général du déroulement du constat Vallée du Rhône.</i>	9
<i>Tableau 2. Catégories de denrées recherchées initialement.</i>	13
<i>Tableau 3. Synthèse des prélèvements de denrées prévus par zone.</i>	14
<i>Tableau 4. Plan de prélèvements et d'analyses : mesures du tritium et du carbone 14 sur des échantillons de feuilles d'arbres (peupliers) prélevés en dehors de la zone proche de Marcoule.</i>	15
<i>Tableau 5. Plan de prélèvements et d'analyses : mesures du tritium et du carbone 14 autour de Marcoule.</i>	16
<i>Tableau 6. Plan de prélèvements et d'analyses : sols et bio-indicateurs prélevés dans les environs de Marcoule.</i>	17
<i>Tableau 7. Résultats des mesures du tritium autour de Marcoule</i>	20
<i>Tableau 8. Résultats de l'estimation du tritium total</i>	26
<i>Tableau 9. Proportion de carbone de quelques denrées et estimation de leur activité massique moyenne en ¹⁴C, en zone non influencée.</i>	29
<i>Tableau 10. Activité spécifique et activité massique du ¹⁴C des feuilles de peupliers prélevées autour de Marcoule.</i>	30
<i>Tableau 11. Résultats de mesure des sols prélevés autour de Marcoule (Bq/kg de sol sec tamisé à 2 mm).</i>	32
<i>Tableau 12. Limites de détection moyennes observées sur les sols (présente étude)</i>	33
<i>Tableau 13. Niveaux d'activité de certains radionucléides des chaînes uranium - thorium observés dans les sols en France.</i>	34
<i>Tableau 14. Rapports isotopiques observés dans les échantillons de sols prélevés aux alentours de Marcoule.</i>	39
<i>Tableau 15. Résultats de mesure des végétaux prélevés autour de Marcoule (Bq/kg frais).</i>	42
<i>Tableau 16. Résultats de mesure par spectrométrie gamma des sables de Camargue (Bq/kg sec).</i>	45
<i>Tableau 17. Résultats de mesure par spectrométrie gamma et alpha des sols (Bq/kg sec) et du riz (Bq/kg frais) prélevés au niveau de la Brèche de Claire Farine (Lauricet).</i>	46

FIGURES

<i>Figure 1. Localisation théorique des zones situées à plus de 20 km des installations, considérées comme non influencées en milieu terrestre (ZNI).</i>	12
<i>Figure 2. Résultats des mesures du tritium autour de Marcoule.</i>	21
<i>Figure 3. Corrélation entre les résultats de mesure du tritium organiquement lié et la distance au site, tous secteurs confondus - comparaison avec quelques données acquises sur des feuilles de chêne en 1992.</i>	22
<i>Figure 4. Localisation du prélèvement de cep de vigne, détail.</i>	24
<i>Figure 5. Valeurs des rapports entre le tritium organiquement lié et le tritium libre (TOL/HTO) présentés ici en fonction de la distance au site.</i>	25
<i>Figure 6. Concentration du tritium dans les végétaux en 2009 : données produites par le CEA et extraites du RNM.</i>	27
<i>Figure 7. Courbe générale d'évolution du ^{14}C dans la biosphère terrestre (mise à jour : juillet 2010).</i>	29
<i>Figure 8. Localisation des peupliers autour de Marcoule sur lesquels des feuilles ont été prélevées pour la mesure du ^{14}C.</i>	30
<i>Figure 9. Localisation des prélèvements de sols autour de Marcoule.</i>	33
<i>Figure 10. Répartition des radionucléides artificiels mesurés dans les sols.</i>	35
<i>Figure 11. Gammes d'activités en ^{137}Cs des échantillons de sols prélevés aux alentours de Marcoule par l'IRSN dans le cadre de différentes études.</i>	36
<i>Figure 12. Gamme d'activités en ^{90}Sr des sols prélevés aux alentours de Marcoule comparée aux valeurs habituellement mesurées dans les sols en France.</i>	36
<i>Figure 13. Évolution de l'activité moyenne en actinides transuraniens des sols prélevés aux alentours de Marcoule.</i>	38
<i>Figure 14. Rapports isotopiques observés dans les sols, comparaison avec les valeurs caractéristiques des retombées des tirs.</i>	40
<i>Figure 15. Localisation des prélèvements de végétaux autour du site de Marcoule.</i>	41
<i>Figure 16. Comparaison des valeurs acquises sur le thym (Codolet 2009) avec divers autres résultats de mesure.</i>	43
<i>Figure 17. Localisation des prélèvements réalisés en Camargue.</i>	44
<i>Figure 18. Comparaison des résultats de 2009 avec ceux acquis précédemment.</i>	45
<i>Figure 19. Comparaison des sols de rizières en 2002 et 2009 et des sols de l'observatoire OPERA (sols prélevés en zones non influencées, dans le massif central et en Bretagne, prélèvements de 2002 à 2008).</i>	48

Préambule

Le constat radiologique Vallée du Rhône a été engagé avant que se soit produit l'accident de Fukushima de mars 2011. Celui-ci a donné lieu, en France métropolitaine, à de très faibles dépôts d'iode 131, qui va s'éliminer rapidement du fait de sa courte demi-vie radioactive (8 jours), et de césium, notamment le césium 134 qui n'était plus détecté depuis quelques années et dont on pourra déceler éventuellement quelques traces dans l'environnement.

Certains prélèvements seront réalisés durant l'été 2011 et l'interprétation des résultats de leurs mesures se fera bien évidemment en tenant compte, le cas échéant, du césium qui pourrait être attribué aux retombées de cet accident.

1 Introduction

1.1 Rappel succinct du contexte, des objectifs et du contenu de l'étude.

L'un des axes d'évolution de la stratégie de surveillance radiologique du territoire concerne la réalisation de constats radiologiques régionaux. L'objectif est d'établir, sur un territoire étendu comportant plusieurs sites d'installations nucléaires, un référentiel actualisé des niveaux de radioactivité dans certains compartiments de l'environnement, en particulier les denrées. Les parties prenantes locales sont associées au déroulement de ces études grâce à des réunions d'information et d'échanges de points de vue où sont conviés notamment des représentants des Commissions locales d'information (CLI).

Chaque constat comporte l'examen des résultats obtenus lors d'études radioécologiques antérieures ou réalisées parallèlement dans un autre cadre.

Ces connaissances sont complétées ou actualisées par un nombre limité de prélèvements d'échantillons et d'analyses : spectrométrie gamma et, pour quelques échantillons, spectrométrie alpha (Am, Pu) et bêta (^{14}C , ^3H , ^{90}Sr).

Les constats prennent en compte la localisation des installations nucléaires en distinguant d'une façon théorique :

- les zones potentiellement influencées (ZI) : à proximité de chacune des installations ;
- les zones non influencées (ZNI), plus ou moins éloignées de ces installations et hors influence en situation normale.

Les prélèvements se composent d'échantillons de diverses natures :

- des productions agricoles dominantes, en zones influencées ou non influencées. La sélection des denrées caractéristiques du territoire est réalisée à une échelle régionale en présélectionnant tout d'abord les catégories de productions statistiquement les plus importantes en valeur économique et en quantités, puis elle est détaillée par production selon les spécificités locales, au niveau des départements et des communes. Enfin, les contacts locaux et les premières campagnes de terrain permettent d'ajuster ces données théoriques (souvent obsolètes) à la réalité du terrain ;
- des échantillons de référence, systématiquement prélevés dans le cadre de la surveillance environnementale exercée par l'IRSN, qui permettent une inter-comparaison plus aisée entre différentes régions françaises (salades ou laits par exemple) ;
- des produits végétaux ou animaux caractéristiques des écosystèmes naturels : champignons, gibiers... ;
- des indicateurs spécifiques de certains radionucléides. Par exemple, pour le carbone 14 et le tritium, des échantillons de feuilles d'arbres permettent de connaître l'activité des produits végétaux et animaux terrestres ; les transuraniens (plutonium, américium...) sont recherchés en priorité dans les sols ou dans certains bio-indicateurs (bryophytes...), étant donné leur niveau d'activité très bas et leur faible propension à être transférés dans les végétaux et les animaux.

Dans ce cadre, a été engagé en 2009 le constat radioécologique « Vallée du Rhône », englobant les communes situées de part et d'autre du fleuve, de l'amont de Creys-Malville, jusqu'en Camargue.

Sur ce territoire sont considérées, en tant que sources potentielles de radionucléides, les grandes installations nucléaires situées directement sur la zone d'étude : les 4 CNPE en activité, le réacteur de Creys-Malville (en démantèlement), les autres installations du complexe de Tricastin-Pierrelatte et celles de Marcoule.

La méthodologie développée pour ce constat a été décrite précédemment (Roussel-Debet et Antonelli, 2010). Ce rapport présente l'état d'avancement de l'étude et les résultats acquis, relativement au milieu terrestre, à la fin de l'année 2010.

1.2 Déroulement de l'étude

Le tableau 1 présente le déroulement du constat. La méthodologie, définie en 2009, a donné lieu à une stratégie d'échantillonnage et de mesures en milieu terrestre et en milieu aquatique, ces deux milieux étant traités différemment et de façon décalée dans le temps. L'étude du milieu aquatique fera donc l'objet d'un rapport d'avancement ultérieur.

Tableau 1. Calendrier général du déroulement du constat Vallée du Rhône.

	2009				2010				2011				2012	
	janv.- mars	avril- juin	juil.- sept.	oct.- déc.	janv.- mars	avril- juin	juil.- sept.	oct.- déc.	janv.- mars	avril- juin	juil.- sept.	oct.- déc.	janv.- juin	juil.- déc.
Définition de la stratégie générale en milieu terrestre														
Prélèvements en milieu terrestre														
Traitements et mesures des échantillons du milieu terrestre														
Définition de la stratégie générale en milieu aquatique														
Prélèvements en milieu aquatique														
Traitements et mesures des échantillons du milieu aquatique														
Analyse des résultats préexistants ou nouveaux														
Présentations en CLI		*				*						*		*
Rapports méthodologique M, rapports d'avancement A et rapport final F		M								A			A	F

Après qu'ait été définie la stratégie générale, les premiers prélèvements en milieu terrestre ont été réalisés majoritairement sur la partie sud du territoire, de mai à décembre 2009. Compte-tenu des connaissances acquises sur cette zone, il a été décidé de focaliser cette partie de l'étude sur des points qui avaient montré dans le passé des singularités en termes de présence de radionucléides particuliers (e.g., tritium, transuraniens...) afin d'observer leur évolution. Parallèlement le plan de prélèvement des denrées a été établi à partir des données statistiques agricoles. Une partie des échantillons a été prélevée, traitée et analysée.

1.3 Rappel de la stratégie générale de prélèvements et de mesures en milieu terrestre

La stratégie de prélèvements et de mesures a été établie pour répondre à deux objectifs principaux.

Il s'agit en premier lieu de vérifier que la concentration en radionucléides des principales productions agricoles du territoire est en accord avec les niveaux attendus, en fonction des connaissances acquises dans l'environnement français, à savoir une très faible rémanence des retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires en ^3H , ^{14}C , ^{90}Sr , ^{137}Cs et actinides (isotopes du plutonium et ^{241}Am) et des retombées de l'accident de Tchernobyl (^{137}Cs) (Renaud et Gurriaran, 2009).

La plupart des sites de la vallée du Rhône ayant fait l'objet de bilans radioécologiques récents (suivis annuels et bilans décennaux autour de sites d'EdF, « point zéro » récent autour du site du site du Tricastin), le plan d'échantillonnage a privilégié pour cet objectif des denrées qui habituellement ne sont pas prélevées lors de ces études ainsi que des zones de production éloignées des sites et qui sont, de ce fait, rarement étudiées. Toutefois, des échantillons de « référence », de la salade et du lait notamment, ont également été prélevés. Ces échantillons qui font l'objet de mesures régulières dans le cadre de ces bilans et aussi dans celui de la surveillance de routine effectuée par les exploitants nucléaires d'une part et l'IRSN d'autre part, permettent en effet d'effectuer des inter-comparaisons temporelles et spatiales.

La méthode de choix des productions agricoles et leur pré-localisation ont été détaillées dans le rapport méthodologique (Roussel-Debet et Antonelli, 2010). À ces prélèvements s'ajoutent, selon leur disponibilité, des échantillons de gibier ou de champignons, dont on sait qu'ils présentent des concentrations en ^{137}Cs relativement plus élevées que celles des denrées d'origine agricole.

Par ailleurs, le tritium et le carbone 14 (d'origine naturelle et anthropique) sont étudiés par l'intermédiaire de mesures de feuilles d'arbres à feuillage caduc qui, compte-tenu du comportement particulier de ces radionucléides (Roussel-Debet 2007, 2008), reflètent leurs concentrations dans tous les compartiments biologiques de l'environnement terrestre, notamment les denrées. En effet, étant donné l'équilibre qui s'établit pour l'un et l'autre de ces isotopes en milieu terrestre respectivement avec l'hydrogène et le carbone stable, les résultats de leur mesure dans un végétal, connus à la variabilité naturelle près, sont applicables, en première approche, à l'ensemble des compartiments biologiques (e.g., Roussel-Debet et al., 2006 ; Roussel-Debet, 2007 et 2008). Ces échantillons, au nombre de 4 à 5, sont répartis en zone non influencée.

Toujours dans l'objectif de disposer d'un état radiologique de référence réactualisé, les sables noirs des plages de Camargue, riches en radioéléments naturels, qui avaient fait l'objet d'investigations en 2005 (Pourcelot et Renaud, 2006) sont également réexaminés dans le cadre de ce constat régional.

En second lieu, il s'agit de compléter les données existantes lorsqu'elles sont jugées insuffisantes ou obsolètes.

Contrairement au site du Tricastin et aux sites d'EdF, celui de Marcoule n'a pas fait l'objet d'un bilan radioécologique récent. Toutefois, les données acquises dans le cadre de la surveillance de routine effectuée par le CEA et par l'IRSN, montrent que le marquage de l'environnement en tritium provenant des installations de ce site, déjà constaté lors d'études plus anciennes (e.g. Descamps et al., 1995 ; 1997), perdure aujourd'hui. Les environs du site de Marcoule sont à ce titre examinés, en ce qui concerne le tritium, avec une densité

d'échantillonnage plus élevée que dans les autres parties du territoire étudié. Des feuilles d'arbres sont prélevées à cet effet ; une partie de ces échantillons est aussi destinée à mesurer le carbone 14.

Enfin, le marquage en plutonium et en américium d'une dizaine de communes riveraines de Marcoule et de certaines rizières de Camargue inondées lors des crues de 1993-1994 avait fait l'objet d'une thèse à la fin des années 90 (Duffa, 2001), puis d'une étude consécutive aux crues de fin 2003 (Eyrolle, 2004 ; Duffa et Renaud, 2004) ; des analyses spécifiques sont dédiées à la vérification de la situation radiologique actuelle de ces zones.

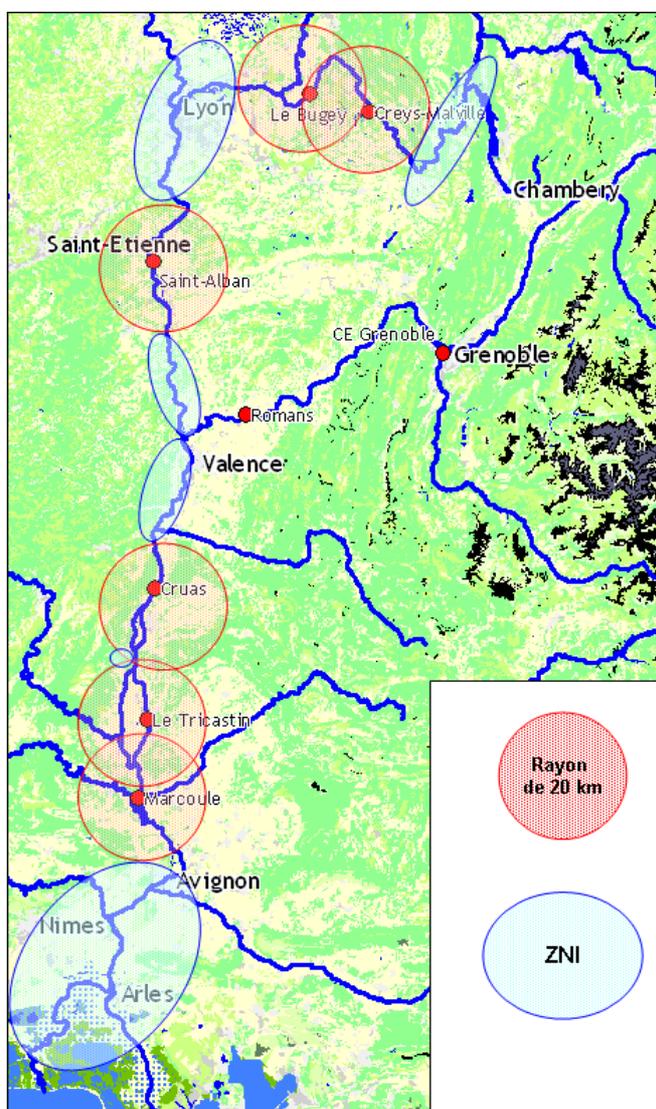
2 État d'avancement des prélèvements et des mesures en milieu terrestre

2.1 Définition des zones de prélèvement

La localisation des prélèvements en milieu terrestre distingue les zones dites « non influencées » (ZNI) qui se trouvent idéalement au-delà de 20 km de toute installation des zones « potentiellement influencées » (ZI), à moins de 5 km – voire plus près – des installations. Cette discrimination a essentiellement pour but de fournir un cadre théorique permettant de distribuer de façon homogène les lieux de prélèvement.

Dans la vallée du Rhône, cette répartition fait apparaître 12 secteurs, de l'amont vers l'aval, cf. figure 1 :

- ZI : Creys-Malville (CRM), Bugey (BUG), St Alban (ALB), Cruas (CRU), Tricastin (TRI), Marcoule (MAR) ;
- ZNI : Amont de Creys, entre Bugey et St Alban (BUG-ALB), entre St Alban et Romans (ALB-ROM), entre Romans et Cruas (ROM-CRU)¹, entre Cruas et Tricastin (CRU-TRI) et Aval Marcoule.



La proximité des sites de Cruas, du Tricastin et de Marcoule fait que l'on se trouve forcément à une distance inférieure ou voisine de 20 km de chacun de ces sites dans l'axe de la vallée. La zone limite située entre Cruas et Tricastin et le plus loin possible de chacun des CNPE peut néanmoins être considérée comme ZNI (d'autant que l'on sait que le marquage des CNPE en milieu terrestre est quasi-inexistant). Dans le cas du secteur Tricastin-Marcoule, la proximité des 2 sites, les rejets importants de Marcoule en tritium et l'orientation des vents dominants dans l'axe de la vallée font que le territoire situé entre Tricastin et Marcoule, le plus loin possible de chacun des 2 sites, ne peut pas être considéré a priori comme ZNI, pour ce qui concerne les concentrations du tritium dans l'environnement terrestre.

Figure 1. Localisation théorique des zones situées à plus de 20 km des installations, considérées comme non influencées en milieu terrestre (ZNI).

¹ Deux zones sont discriminées pour tenir compte de la confluence Rhône-Isère. Les rejets liquides des sites de Grenoble et de Romans/Isère seront pris en compte en analysant des échantillons prélevés en amont et en aval de cette confluence.

2.2 Prélèvements de denrées

2.2.1 Plan de prélèvement et de mesures des denrées

Le plan préliminaire décrit dans le rapport méthodologique (Roussel-Debet et Antonelli, 2010) prévoyait l'échantillonnage d'environ une cinquantaine de denrées, réparties approximativement pour moitié entre ZI et ZNI, sur lesquelles étaient prévues des mesures par spectrométrie gamma à bas bruit de fond et, pour les produits laitiers, des mesures du ^{90}Sr (tableau 2). Les communes sur lesquelles étaient supposées se trouver les productions recherchées avaient été répertoriées en utilisant les statistiques agricoles communales AGRESTE 2000, dont on sait qu'elles ne peuvent donner qu'une vision grossière des productions réellement et actuellement présentes sur le territoire. Les communes présélectionnées se trouvaient dans les limites spatiales qui avaient été assignées initialement à l'étude (communes limitrophes du fleuve).

Tableau 2. Catégories de denrées recherchées initialement.

Légumes	Courgettes ou tomates (ou légumes méditerranéens...)
Fruits	Salades ou légumes feuilles
	Abricots, pêches ou cerises
	Poires, pommes ou prunes
	Olives, châtaignes, noix...
Produits d'origine animale	Raisin (vin)
	Vianades
	Fromage de chèvre
Autres (bio-indicateurs...)	Lait de vache
	Champignons, gibier, sols : <i>selon disponibilité et intérêt local</i>

À partir de cette trame, une recherche plus détaillée a été faite en utilisant les données de l'Institut national de l'origine et de la qualité (INAO) afin de mieux connaître les produits « remarquables » par zone géographique (cf. annexe 1). Cette étape a mis en évidence certaines productions majeures, non répertoriées dans l'étude préliminaire. Par exemple, l'élevage de volaille (viandes de poulet, dindes, dindons... et production d'œufs) est très représenté dans le couloir rhodanien entre St-Alban et Marcoule. Les données statistiques AGRESTE 2000 ont été étudiées à nouveau, en élargissant les champs d'observation, afin de prendre en compte les communes jouxtant la zone définie en première approche, où se trouveraient des produits certifiés. Le croisement de ces deux sources de données a permis de cibler les communes à prospecter (cf. annexe 2).

Ensuite, une liste d'exploitations et d'institutions susceptibles de fournir des renseignements sur ces pratiques agricoles (mairies, chambre d'agriculture...) a été établie, en utilisant différents supports existants : annuaires et sites internet professionnels (cf. annexe 3). Cette liste représente un point de départ pour orienter les recherches in situ, le complément d'information étant acquis sur le terrain, à la rencontre des habitants et des exploitants. Compte-tenu d'une part de l'étendue de la zone d'étude et d'autre part des variations géographiques, climatiques et des pratiques culturelles locales, un calendrier de prélèvement a été établi pour optimiser les périodes de collecte (annexe 4). Enfin, une synthèse des prélèvements prévus dans le cadre d'autres études concomitantes a été faite pour optimiser les campagnes de prélèvement en termes de moyens humains et financiers et d'éviter les doublons avec des études en cours. Le tableau 3 résume le plan de prélèvement prévu.

Tableau 3. Synthèse des prélèvements de denrées prévus par zone.

(le symbole * signifie que le prélèvement est fait dans le cadre d'autres études, soit très récentes soit simultanées)

Zone (cf. figure 1)	Espèces	ZI/ZNI
Amont CRM	Vin Poirs, pommes ou prunes Lait de vache Viande	ZNI
CRM	Lait de vache* Salade*	ZI
BUG	Poirs, pommes ou prunes Viande Lait de vache* Salade* Raisin ou Vin* Maïs*	ZI
BUG-ALB	Raisin ou vin Salade Tomates, poivrons Lait de vache	ZNI
ALB	Lait de vache* Salade* Viande	ZI
ALB - ROM	Vin Fromage de chèvre Miel Noix	ZNI
ROM-CRU	Abricots, pêches ou brugnons Châtaignes Courgettes ou tomates Vin Fromage chèvre Viande Ail	ZNI
CRU	Pêches ou brugnons Courgettes ou tomates Œufs Viande Lait de chèvre* Salade*	ZI
CRU-TRI	Pêches ou brugnons Lait de chèvre Viande Thym Tomates ou poivrons Ail	ZNI
TRI	Courgettes ou tomates* Fromage chèvre Thym Viande Ail Miel Céréales * Laits de chèvre	ZI
MAR	Salade Thym Raisin	ZI
Aval MAR	Huile d'olive Viande Viande Aromatiques (thym) Fromage chèvre Abricots Pêches ou brugnons Courgettes ou tomates Riz de Camargue	ZNI

2.2.2 État d'avancement concernant les denrées

À la fin de l'année 2010, 80 % des prélèvements de denrées ont été réalisés et les échantillons sont soit en cours d'analyse, soit mesurés (cf. annexe 5). L'ensemble des résultats relatifs aux denrées fera l'objet d'un rapport ultérieur lorsque toutes les mesures auront été acquises et auront pu être confrontées aux données préexistantes. Il est toutefois possible d'indiquer, à ce stade de l'étude, que les quelques résultats déjà obtenus ne présentent aucune anomalie par rapport aux valeurs attendues.

2.3 Plan de prélèvements d'échantillons destinés à mesurer le tritium (^3H) et le carbone 14 (^{14}C), hors de la zone influencée par Marcoule.

L'hydrogène (H) et le carbone (C) sont deux constituants majeurs de la matière vivante. Leurs isotopes radioactifs respectifs, le tritium (^3H) et le carbone 14 (^{14}C), se comportent comme l'isotope stable de chaque élément (hydrogène et carbone, respectivement) et suivent deux cycles majeurs dans la biosphère et la géosphère : le cycle de l'eau pour le tritium et le cycle du carbone pour le ^{14}C .

En milieu terrestre, les végétaux, et notamment les feuilles d'arbres, permettent d'évaluer le niveau de concentration du tritium et du carbone 14 dans l'environnement. Le peuplier a été retenu comme type d'arbre car il est largement répandu en vallée du Rhône ; de plus Descamps et al. (1995) ont montré que la contamination des feuilles de cet arbre est respectivement de 1,5 à 1,9 fois supérieure à celle des chênes blancs et verts, dans des conditions identiques de contamination environnementale.

Des échantillons de feuilles d'arbres destinés aux mesures de ces radionucléides ont été prélevés en 7 points répartis le long de la vallée du Rhône (tableau 4) et sont en cours d'analyse.

Tableau 4. Plan de prélèvements et d'analyses : mesures du tritium et du carbone 14 sur des échantillons de feuilles d'arbres (peupliers) prélevés en dehors de la zone proche de Marcoule.

N° d'échantillon	Zone de prélèvement	Tritium libre HTO	Tritium organiquement lié, TOL	Carbone 14
2010-50	ZNI- Amont CREYS	1	1	1
2010-49	ZNI-entre BUG-ALB	1	1	1
2010-48	ZI-ALB	1	1	1
2010-47	ZNI-entre ALB - ROM	1	1	1
2010-46	ZNI-entre ROM-CRU	1	1	1
2010-45	ZNI entre CRU-TRI	1	1	1
2010-213	ZNI AVAL MAR	1	1	1

2.4 Cas particulier des sables de Camargue

Des échantillons de sables noirs provenant des plages de Camargue (Saintes-Maries-de-la-Mer) qui avaient une concentration relativement élevée en radioéléments naturels et qui avaient été étudiés en 2003 ont été à nouveau prélevés en 2009, sur l'une des plages où les concentrations les plus élevées avaient été observées (plage du phare de Beauduc). Ces échantillons ont été analysés en spectrométrie gamma.

2.5 Plan de prélèvements spécifiques au site de Marcoule

2.5.1 Tritium et carbone 14

Le plan de prélèvement particulier, conçu pour la mesure du tritium (et du carbone 14, sur quelques échantillons), dans un rayon de 5 km autour de Marcoule est résumé au tableau 5. Pour compléter les échantillons de 2009, 3 autres prélèvements ont été réalisés en 2010, l'un sur l'arbre situé au sud et le plus proche du site déjà échantillonné en 2009 (N°20 en 2009, N°40 en 2010), les deux autres respectivement au nord (N°38) et au sud (N°43) de la zone explorée précédemment, à une distance respective de 9 et 13 km, afin de voir l'extension longitudinale de la zone influencée par les rejets du site. Par ailleurs, il nous a été possible fortuitement de pouvoir échantillonner du bois de cep de vigne, sur une parcelle de Codolet, où la vigne était en cours d'arrachage ; cet échantillon (N°51), dont l'ancienneté est estimée à 10 à 15 ans, est précieux pour estimer grossièrement s'il y a eu ou non accumulation du tritium dans le bois, à partir de la mesure du tritium organiquement lié (cf. § 3.1.1).

Tableau 5. Plan de prélèvements et d'analyses : mesures du tritium et du carbone 14 autour de Marcoule.

(Feuilles de peupliers, sauf mention contraire*)

N° d'échantillon	Station	Distance (km)	Orientation	Tritium libre HTO	Tritium organiquement lié TOL	Carbone 14
Prélèvements de juillet 2009						
16	L'Ardoise	5,0	S	1	1	
17	Laudun	4,9	SW	1	1	
18	La Dent de Signac	2,5	SW	1	1	
19	Les Gazières	2,5	S-SW	1	1	
20	Marcoule 1	0,2	S	1	1	1
21	Marcoule 2	0,9	W	1	1	1
22	Dent de Marcoule 1	2,8	N	1	1	
23	Dent de Marcoule 2	2,1	N-NE	1	1	
24	Belvédère	0,8	N-NE	1	1	1
25	Chusclan	1,9	NW	1	1	
26	Station de rejet - clôture Sud	1,1	NE	1	1	1
27	Les Cabanes - Caderousse Nord	4,7	S-SE	1	1	
28	Le Panier - Caderousse Nord	2,5	S-SE	1	1	
29	Ouest d'Orange	2,9	E	1	1	
Prélèvements de juin 2010						
38	St Laurent des arbres	8,9	S	1	1	1
40	Marcoule 1	0,2	S	1	1	1
43	Pont St Esprit	13,5	N-NW	1	1	1
51	Codolet (cep de vigne*)	1,5	S	non mesuré	1	non mesuré

2.5.2 Rémanence des émetteurs alpha au voisinage du site de Marcoule

En fonction des résultats des mesures d'actinides transuraniens (Am, Pu...), réalisées en 2000 à proximité de Marcoule, sur des mousses terrestres, du thym, du raisin, de la salade et des sols, de nouveaux prélèvements (tableau 6) ont été faits aux endroits où étaient observées les activités les plus élevées en plutonium et américium, afin de voir leur évolution.

Tableau 6. Plan de prélèvements et d'analyses : sols et bio-indicateurs prélevés dans les environs de Marcoule.

N°	Station	Échantillon	Spectrométrie gamma	Spectrométrie alpha	Strontium 90
33	Cimetière de Codolet	Sol cultivé	2	2	2
35	Grange Chabert - Codelet sud -	Sol cultivé	2	2	2
5	Grange Chabert - Codelet sud -	Sol non cultivé	4	2	2
2	Les Granges Arnaud - Codolet	Sol non cultivé forestier	1	1	1
8	Le Panier - Caderousse Nord	Sol non cultivé forestier	2	2	2
7	Barrage de Caderousse - rive gauche	Sol non cultivé	1	1	1
1	Cimetière de Codolet	Mousses terrestres	1	1	1
6	Grange Chabert - Codelet sud -	Mousses terrestres	1	1	1
3	Les Granges Arnaud - Codolet	Thym	1	1	1
4	Grange Chabert - Codelet sud -	Thym	1	1	1
30	Codolet	Salade	1	1	1
32	Cimetière de Codolet	Raisin	1	1	1
34	Grange Chabert - Codelet sud -	Raisin	1	1	1

2.5.3 Riz et sol de Camargue

Du riz de Camargue et le sol de rizière associé ont été prélevés au niveau de la Brèche de Lauricet, à l'un des endroits où les rizières avaient été soumises à de fortes inondations en 2003 et où l'on pouvait détecter l'influence des dépôts de sédiments marqués par les rejets anciens de Marcoule suite à leur remise en suspension et à leur transport vers l'aval durant cet épisode de crue. Ces échantillons ont été mesurés par spectrométrie gamma et alpha.

3 Résultats obtenus en 2010

Les résultats obtenus en 2010 et présentés ci-après concernent les environs du site de Marcoule et le Rhône aval.

3.1 Le tritium dans l'environnement du site de Marcoule

3.1.1 Rappel des principales caractéristiques du tritium

Le tritium est l'isotope radioactif de masse 3 de l'hydrogène. C'est un émetteur bêta, de période 12,3 ans. Son origine, dans l'environnement non influencé par un rejet, est naturelle (production cosmique) et pour une faible part artificielle (rémanence des retombées des tirs d'essais atmosphériques). Sa caractéristique fondamentale, déterminant son comportement, est son extrême propension à s'échanger plus ou moins rapidement avec l'hydrogène environnant, en particulier lorsqu'il se trouve sous ses formes dites *labiles*, et notamment sous forme de vapeur d'eau. De façon générale, il suit le cycle de l'eau et il s'incorpore à l'eau et la matière organique de tous les organismes vivants (Roussel-Debet, 2008).

Les formes sous lesquelles se trouve le tritium dans la matière vivante, notamment végétale, font encore l'objet de recherches et leurs définitions sont autant liées aux protocoles permettant leur séparation qu'à leur spéciation sensu stricto. De façon simplifiée, on considère que le tritium peut se trouver sous deux formes :

- tritium dit *libre* sous forme d'eau tritiée, HTO qui est défini comme étant le tritium de la fraction extraite du végétal par dessiccation (en général, lyophilisation) ; le résultat de sa mesure s'exprime en Bq/L d'eau de dessiccation ; la proportion de cette eau (dite « eau libre », variant de 0,05 à 0,95) dans l'échantillon initial non séché, dépend très fortement du type d'échantillon, plus ou moins riche en eau et matière sèche ;
- tritium dit *organiquement lié* (TOL), dont une partie est échangeable, constitué du tritium de la matière sèche². Il se mesure à partir de l'eau issue de la combustion (incinération) de la matière sèche de l'échantillon ; le résultat de sa mesure s'exprime en Bq/L d'eau de combustion ; la proportion de cette eau dans la matière sèche varie peu (environ 0,5 à 0,7 L/kg de matière sèche) car elle dépend uniquement de la composition de la matière organique de l'échantillon, plus ou moins riche en hydrogène³.

Il est à souligner que l'extrême labilité du tritium rend incertains les résultats de sa mesure, particulièrement pour ce qui concerne le tritium libre HTO (Roussel-Debet, 2008 ; Renaud, 2010).

En effet, les échanges du tritium avec l'hydrogène de la vapeur d'eau de l'air, entre le moment du prélèvement et celui de la mesure sont inéluctables. Ceci se produit malgré les précautions prises : refroidissement des échantillons, stockage en sacs étanches, etc., d'autant qu'il est rarissime qu'il soit possible de lyophiliser

² La matière sèche est assimilée à la matière organique, en négligeant une fraction faible (quelques pourcents) de minéraux. On distingue, en outre, le *tritium organiquement lié échangeable* (environ 30 % du TOL) du *tritium organiquement lié non échangeable* (environ 70 % du TOL).

³ Le rendement de chaque combustion est une valeur fluctuante, ce qui fait que la valeur de la proportion d'eau dans la matière sèche est mesurée à chaque combustion et les métrologistes donnent également le résultat de la mesure en Bq/kg sec.

l'échantillon avant plusieurs heures, voire plusieurs jours, après son prélèvement⁴; en outre, le tritium libre de l'échantillon au moment de son prélèvement représente, dans le meilleur des cas, les conditions de concentration du tritium ambiant durant les heures qui ont précédé ce prélèvement. Une mesure du tritium organiquement lié rend mieux compte de l'intégration successive des niveaux de tritium ambiant durant le temps pendant lequel la matière organique s'est formée, sans toutefois que l'on puisse prétendre à une parfaite restitution de la concentration *in situ* de l'échantillon, en raison du fait qu'une petite partie du TOL est échangeable.

Lorsque le niveau moyen de tritium ambiant fluctue peu, les deux formes tritium libre et tritium organiquement lié sont à l'équilibre et présentent des valeurs moyennes proches et relativement peu variables dans les matrices environnementales. Lorsque des contaminations discrètes (discontinues) se succèdent (quels qu'en soient leurs niveaux), l'examen du tritium organiquement lié est davantage représentatif de l'état de contamination de l'environnement (actuel ou rémanent) dans les échantillons biologiques.

En milieu terrestre, hors de l'influence d'une installation nucléaire, les concentrations du tritium organiquement lié sont du même ordre de grandeur ou très légèrement supérieures aux limites de détection, variant de 0,9 à 3 Bq/L pour tous les échantillons biologiques, indépendamment de leur nature. Les valeurs relatives au tritium libre sont du même ordre de grandeur, en moyenne 1,5 Bq/L et la concentration totale en tritium des végétaux et des denrées d'origine agricole se situe actuellement en moyenne entre 0,5 et 3 Bq/kg frais (Roussel-Debet, 2008). La faible variabilité des concentrations en tritium naturel et hérité des retombées anciennes, permet de déceler de façon assez sensible une augmentation de ce bruit de fond, dès lors que la valeur du TOL dépasse 2 fois la valeur de 3 Bq/L d'eau de combustion dans un échantillon de l'environnement terrestre. Ainsi, les mesures réalisées sur des feuilles annuelles d'arbres, représentatives de l'ambiance tritiée qui a prévalu durant leur période de croissance (quelques mois) permettent de discriminer un environnement marqué par des rejets comme c'est le cas pour Marcoule, et même de délimiter l'extension de la zone concernée.

3.1.2 Valeurs mesurées en 2009 et 2010

Le tableau 7 et la figure 2 présentent les résultats obtenus.

Les données météorologiques relatives aux périodes ayant précédé les prélèvements sont reportées en annexe 5. On peut noter que durant la période de végétation (approximativement du mois de mars jusqu'à la date de prélèvement), les directions de vents étaient globalement similaires à ceux mesurés en moyenne annuelle, avec une orientation dominante nord → sud ; toutefois les mois d'avril et mai 2009 (particulièrement pluvieux) se sont accompagnés de vents relativement fréquents vers les secteurs nord (vents du sud, lors des épisodes pluvieux) et sud-est (vents du nord-est), aboutissant probablement à une dispersion plus « étalée » du tritium atmosphérique.

3.1.2.1 Tritium organiquement lié

Nous nous intéressons en premier lieu au tritium organiquement lié, davantage susceptible de refléter la contamination de l'environnement que le tritium libre HTO. Les concentrations en tritium organiquement lié (TOL)

⁴ Les échantillons récoltés sont placés dans des sacs plastiques hermétiques, en glacière puis congelés à leur arrivée au laboratoire ; ils sont lyophilisés plusieurs semaines après récolte et la lyophilisation dure une quarantaine d'heures. Seule une lyophilisation *in situ* immédiate et de durée très courte pourrait éviter des échanges entre le tritium des végétaux et celui de l'air ambiant.

des feuilles de peupliers vont de 25 Bq/L à Pont-St-Esprit (point N°43, le plus éloigné au Nord du site, prélèvement de 2010) à plus de 1100 Bq/L (1440 Bq/L en 2009 et 1136 Bq/L en 2010) pour le point situé à proximité immédiate et au sud du site (N°20 et 40).

Tableau 7. Résultats des mesures du tritium autour de Marcoule

(Feuilles de peupliers, sauf mention contraire*)

N°	Date de prélèvement	Station	TOL Bq/L	HTO Bq/L	TOL (Bq/kg sec)
16	01/07/2009	L'Ardoise	104,0 ± 5,0	21,8 ± 1,1	56,5 ± 2,8
17	01/07/2009	Laudun	54,1 ± 2,7	5,1 ± 0,7	29,5 ± 1,5
18	01/07/2009	La Dent de Signac	53,4 ± 2,7	6,9 ± 0,8	29,1 ± 1,5
19	01/07/2009	Les Gazières	83,2 ± 4,2	13,6 ± 1	44 ± 2,2
20	01/07/2009	Marcoule 1	1439 ± 72	205,2 ± 16,6	813 ± 41
21	01/07/2009	Marcoule 2	338 ± 17	30,4 ± 1,4	182 ± 10
22	02/07/2009	Dent de Marcoule 1	79,7 ± 4	42 ± 1,7	45,1 ± 2,3
23	02/07/2009	Dent de Marcoule 2	208 ± 11	283,4 ± 7,7	118 ± 6
24	02/07/2009	Belvédère	664 ± 34	332,7 ± 8,9	363 ± 19
25	02/07/2009	Chusclan	313 ± 16	232,1 ± 6,5	177 ± 9
26	02/07/2009	Station de rejet - clôture Sud	232 ± 12	112,9 ± 3,4	123 ± 7
27	02/07/2009	Les Cabanes - Caderousse Nord	127 ± 7	55,2 ± 2	66 ± 4
28	02/07/2009	Le Panier - Caderousse Nord	167 ± 9	93,3 ± 3,1	91,4 ± 4,6
29	02/07/2009	Ouest d'Orange	78,5 ± 3,9	56,3 ± 2,1	41 ± 2,1
38	08/06/2010	Saint Laurent des arbres	68,6 ± 3,1	8,6 ± 0,8	36,3 ± 1,7
40	08/06/2010	Marcoule 1	1136 ± 31	105,6 ± 3,8	645,1 ± 20,5
43	08/06/2010	Pont St Esprit	25,3 ± 2,0	8,5 ± 0,8	13,4 ± 1,1
51	04/06/2010	Codolet (cep de vigne*)	90,3 ± 3,6	non mesuré	44,4 ± 2

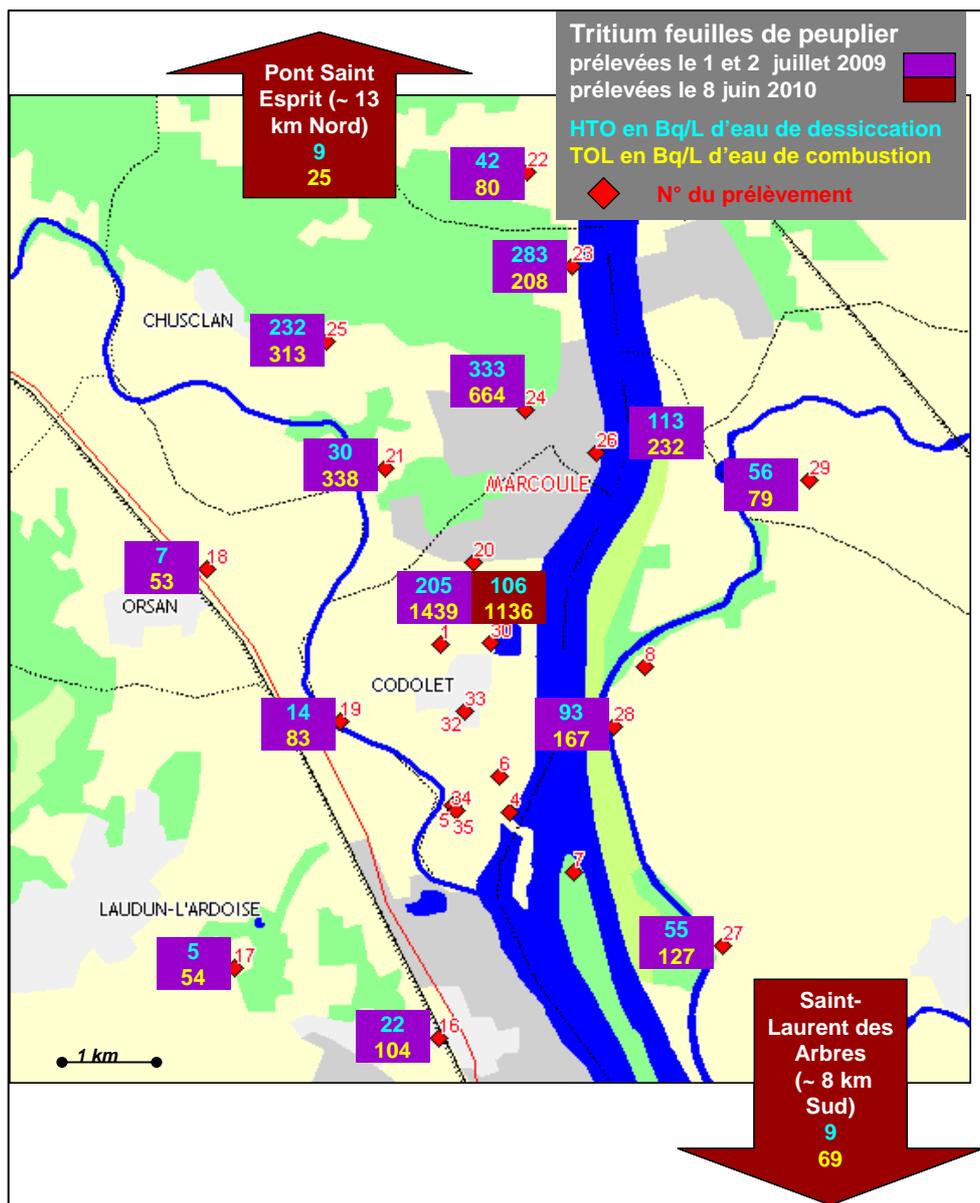


Figure 2. Résultats des mesures du tritium autour de Marcoule.

a - Valeurs 2009 obtenues sur les échantillons prélevés à proximité du site

Les concentrations mesurées à proximité du site, dans un rayon de 5 km (prélèvements de 2009), reflètent relativement bien l'allure de la rose des vents, avec une contamination plus élevée dans l'axe de la vallée que sur les secteurs est et ouest, et qui décroît très rapidement avec la distance au site. Sur l'axe est - ouest, à la latitude de la clôture sud du site, les concentrations du TOL sont nettement plus faibles.

La figure 3, qui représente le tritium organiquement lié en fonction de la distance (indépendamment du secteur des prélèvements, ce qui est, bien sûr, une façon approchée de représenter les résultats) permet de constater que cette diminution est grossièrement cohérente avec les modèles de dispersion atmosphériques classiques (dans lesquels la concentration varie en fonction inverse de la distance).

b- Comparaison avec les valeurs anciennes

Les valeurs obtenues peuvent être approximativement comparées à celles qui avaient été mesurées en 1992 par Descamps et al. (1995) sachant que cette comparaison est entachée de différentes incertitudes : en effet, en premier lieu, la position des points anciens est approximative (lecture directe sur une carte manuscrite, sans indications des coordonnées). D'autre part, les chroniques de rejets atmosphériques de 1992 et 2009 sont différentes. De plus il s'agissait en 1992 de feuilles de chêne et non de peuplier. Pour améliorer cette comparaison, les valeurs de Descamps sont affectées d'un coefficient qui prend en compte : d'une part le rapport des rejets atmosphériques de tritium cumulés sur la période de végétation (de mars à la date de prélèvement) en 1992 et en 2009 (ce rapport est égal à 0,7 environ) et, d'autre part, la différence moyenne observée entre les concentrations du TOL dans les feuilles de chêne par rapport aux feuilles de peuplier, soit un rapport de 0,6 (valeurs dites « corrigées » sur le graphe). Malgré cet ensemble d'incertitudes, il apparaît que les valeurs de la présente étude et celles des mesures anciennes sont cohérentes.

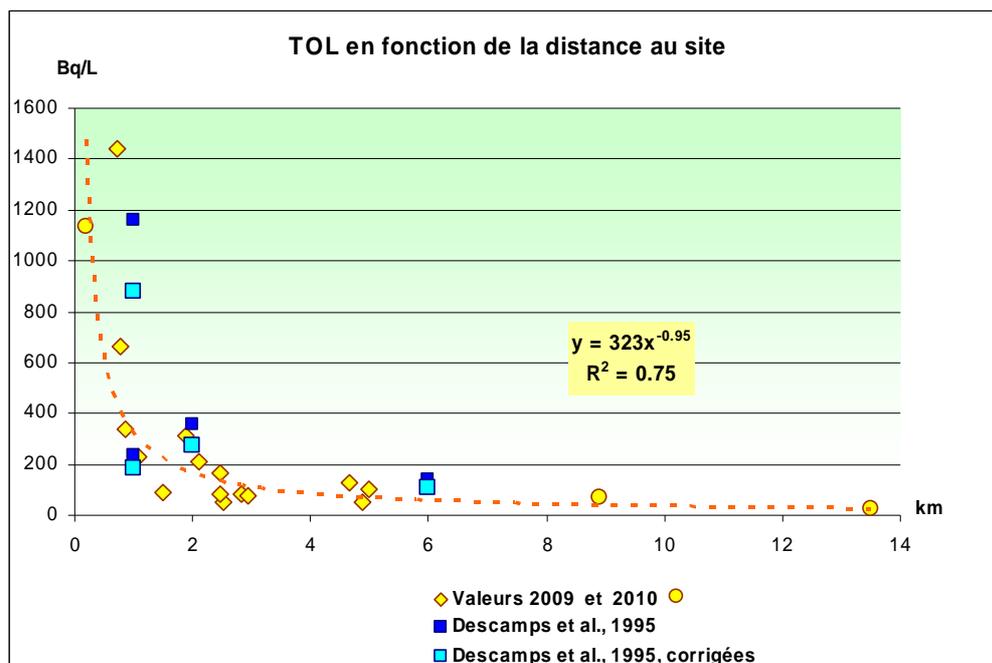


Figure 3. Corrélation entre les résultats de mesure du tritium organiquement lié et la distance au site, tous secteurs confondus - comparaison avec quelques données acquises sur des feuilles de chêne en 1992.

c- Extension de la zone influencée

À une dizaine de kilomètres au sud du site, l'échantillon prélevé à St-Laurent des Arbres (prélèvement de 2010) témoigne d'une influence sensible des rejets de Marcoule, avec une valeur de TOL égale à $68,6 \pm 3,1$ Bq/L.

Vers le nord, l'influence directe de Marcoule est perceptible jusqu'à plus de 14 km : avec $25,3 \pm 0,3$ Bq/L à Pont-St-Esprit (prélèvement 2010), la contamination environnementale est faible mais avérée, par rapport à un bruit de fond de l'ordre de 1 Bq/L. Pour ce prélèvement peut néanmoins se poser la question de l'influence du site de

Pierrelatte-Tricastin (situé à environ 5 km au N-NE) ; une autre étude réalisée en 2009 (Claval, 2010) fait état des résultats suivants : $12,2 \pm 0,7$ Bq/L dans des abricots (pulpe) à Mondragon, puis en remontant vers le nord, donc en se rapprochant du site de Pierrelatte-Tricastin, des concentrations plus faibles, de l'ordre de 5 Bq/L dans les végétaux et enfin, un peu plus au nord et donc au sud immédiat du site de Pierrelatte-Tricastin, une valeur de 12 ± 2 Bq/L (feuilles de chêne). Ces résultats montrent que les prélèvements situés à la latitude de Pont-St-Esprit et Mondragon sont en grande partie influencés par Marcoule (puisque, vers le nord, les concentrations diminuent puis ré-augmentent ensuite). Ceci est d'ailleurs cohérent avec l'importance relative des rejets atmosphériques des CNPE (environ 2 TBq/an pour Tricastin) par rapport à ceux de Marcoule (de l'ordre de 320 TBq/an).

Ainsi, dans le cas particulier du site de Marcoule, l'importance des rejets et le fait que les vents dominants soient concentrés sur des secteurs étroits (N-S et S-N), la zone influencée (ZI) par le tritium atmosphérique déborde largement le périmètre de quelques km, considéré habituellement. Pour mémoire, l'étude de Descamps et al. (1995) montrait que l'extension sud de cette zone allait jusqu'en Arles.

d - Évolution 2009-2010

Les résultats obtenus pour le point de prélèvement où sont observées les concentrations maximales (Marcoule-1 au sud immédiat du site) sont de 1439 ± 72 Bq/L en 2009 (N° 20) et de 1136 ± 31 Bq/L en 2010 (N° 40).

On peut remarquer que ce point de prélèvement est « singulier ». En effet, il se situe à un endroit qui peut éventuellement être soumis à des turbulences par vent de Nord, en raison de la présence de la colline située un peu plus au nord ; par ailleurs l'influence des eaux de nappe dont les concentrations sont de l'ordre de la centaine de Bq/L⁵ est envisageable (le système racinaire des arbres peut aller jusqu'à plusieurs mètres) ; néanmoins, l'absence de connaissances sur la contribution de l'eau absorbée à l'augmentation du tritium TOL du végétal (ou à sa dilution), tout comme l'absence de modélisation de cette voie de transfert éventuelle, rend impossible une discussion plus approfondie des spécificités du transfert du tritium dans cet arbre.

Les rejets atmosphériques de tritium ont diminué entre ces deux années en raison de l'arrêt des réacteurs *Célestins* en fin 2009. Le rapport des activités rejetées qui ont eu lieu durant les périodes de végétation (mars à date de prélèvement) est de 1,7 entre 2009 et 2010. Cette diminution s'est répercutée sur les activités en tritium organiquement lié des feuilles.

Dans le futur, l'arrêt programmé de l'ATM (Atelier tritium de Marcoule, de l'INBs) devrait contribuer à une diminution des rejets de tritium ; inversement, d'éventuelles opérations de démantèlement d'unités mises à l'arrêt pourraient s'accompagner d'augmentation des rejets tritiés. Dans ce contexte, il serait donc particulièrement intéressant de poursuivre l'étude de l'évolution dans le temps du tritium lié de quelques échantillons de feuillages.

⁵ Selon les mesures des piézomètres de Chusclan et Codolet, produites par le CEA et visibles sur le site internet du Réseau national de mesures de la radioactivité mesure-radioactivite.fr/public/.

e- Résultat obtenu sur l'échantillon de cep de vigne de Codolet

L'activité en TOL de cet échantillon (N° 51, cf. figure 4), prélevé à environ 1 km au sud du site est de $90,3 \pm 3,6$ Bq/L ; le fait que cet échantillon⁶, en place depuis plusieurs années, ne présente pas une concentration en TOL supérieure à celles des échantillons de feuillages annuels situés à proximité tend à montrer qu'il n'y a pas de bioaccumulation du tritium dans le bois.

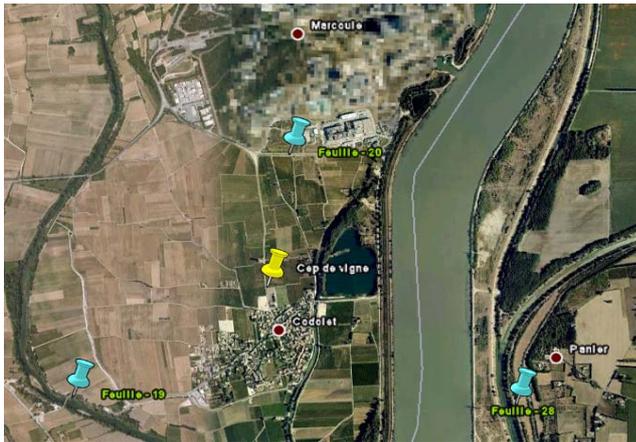


Figure 4. Localisation du prélèvement de cep de vigne, détail.

3.1.2.2 Tritium libre

Comme indiqué précédemment, les résultats de mesure du tritium libre (HTO) sont entachés d'erreurs, dans la mesure où d'une part, ils représentent essentiellement les conditions qui prévalent immédiatement avant le prélèvement d'échantillons. D'autre part, faute de pouvoir effectuer la mesure au moment du prélèvement ou de stabiliser le tritium libre du végétal entre le prélèvement et la lyophilisation préalable à la mesure, il est très probable que le tritium HTO s'échange avec celui de la vapeur d'eau atmosphérique, a minima durant le transport des échantillons jusqu'à leur arrivée au laboratoire.

Les valeurs de tritium libre (HTO) obtenues sur les échantillons de 2009 vont de $5,1 \pm 0,7$ Bq/L à 5 km au sud-ouest du site à $332,7 \pm 8,9$ Bq/L à moins d'un km au nord-nord-est.

Les échantillons prélevés sur l'arbre situé au sud immédiat du site, le plus contaminé en TOL, présentent en 2009 et 2010 des valeurs en HTO respectivement de $132,4 \pm 10,7$ Bq/L et $70,4 \pm 2,5$ Bq/L.

Les échantillons (2010) prélevés à plus grande distance au nord et au sud du site ont des concentrations similaires en HTO : $5,6 \pm 0,5$ et $5,7 \pm 0,5$ Bq/L.

Le graphique de la figure 5 présente les valeurs des rapports TOL/HTO qui s'échelonnent entre 0,7 et 11,1 de façon erratique, sans aucune tendance discernable.

⁶ L'échantillon a été constitué en découpant, puis broyant finement une « tranche » entière, comprenant donc le bois de toutes les années de croissance du cep.

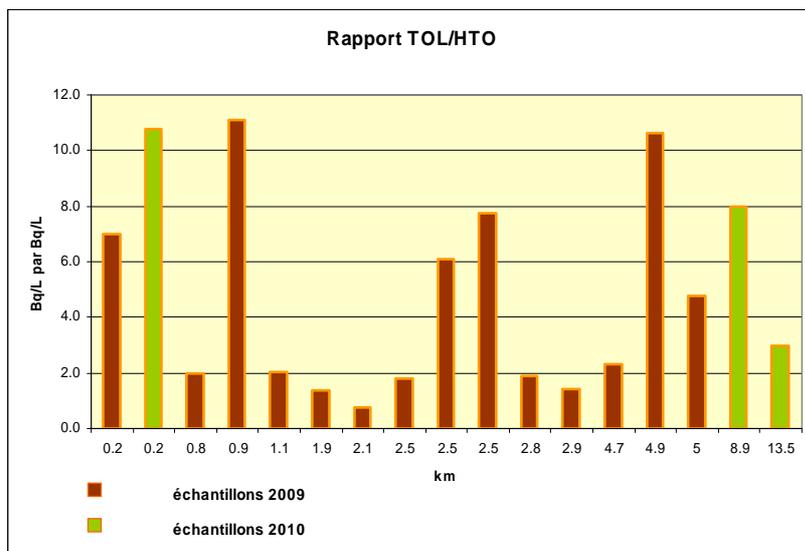


Figure 5. Valeurs des rapports entre le tritium organiquement lié et le tritium libre (TOL/HTO) présentés ici en fonction de la distance au site.

Ces résultats montrent que dans cette zone, l'activité du tritium fluctue avec les rejets et les conditions météorologiques associées ; il est également possible que les biais de traitements et de mesures des échantillons décrits précédemment expliquent en partie les valeurs supérieures à 1 des rapports TOL/HTO.

La mesure du tritium libre des végétaux terrestres présente donc peu d'intérêt, en particulier sur des territoires directement impactés par des rejets.

3.1.2.3 Tritium total

Le tritium total, exprimé en Bq/kg frais de feuillage, est estimé (tableau 8) à partir des deux formes TOL et HTO en prenant en compte dans cette évaluation :

- d'une part la valeur réellement mesurée du tritium libre, dont nous avons souligné la mauvaise représentativité ;
- d'autre part une concentration HTO = TOL (Bq/L), ce qui donne une borne supérieure de la concentration totale in situ des végétaux.

Les moyennes respectives de ces valeurs s'échelonnent entre 125 Bq/kg frais (HTO mesuré) et 236 Bq/kg frais (HTO = TOL), avec des maxima atteints pour les deux échantillons situés à proximité immédiate du site, au sud (Marcoule-1 : de l'ordre de 1000 Bq/kg frais) et au nord (Belvédère : de l'ordre de 450 Bq/kg frais) ;

Tableau 8. Résultats de l'estimation du tritium total

(Feuilles de peupliers, sauf mention contraire*)

N°	Date de prélèvement	Station	Tritium total calculé (Bq/kg frais) ⁷	
			avec la valeur de HTO (Bq/L) mesurée	avec HTO (Bq/L) pris égal à TOL (Bq/L)
16	01/07/2009	L'Ardoise	35	86
17	01/07/2009	Laudun	14	45
18	01/07/2009	La Dent de Signac	18	41
19	01/07/2009	Les Gazières	25	68
20	01/07/2009	Marcoule 1	421	1217
21	01/07/2009	Marcoule 2	90	276
22	02/07/2009	Dent de Marcoule 1	43	69
23	02/07/2009	Dent de Marcoule 2	228	178
24	02/07/2009	Belvédère	343	560
25	02/07/2009	Chusclan	212	262
26	02/07/2009	Station de rejet - clôture Sud	116	194
27	02/07/2009	Les Cabanes - Caderousse Nord	59	105
28	02/07/2009	Le Panier - Caderousse Nord	93	141
29	02/07/2009	Ouest d'Orange	51	66
38	08/06/2010	Saint Laurent des arbres	18	57
40	08/06/2010	Marcoule 1	286	972
43	08/06/2010	Pont St Esprit	10	21
51	04/06/2010	Codolet (cep de vigne*)	nm	50

⁷ La concentration en tritium total (Bq/kg frais) est évaluée par : [TOLs] × [PS/PF] + HTO × (1-[PS/PF])

[TOLs] Tritium organiquement lié, exprimé ici par rapport au poids sec (Bq/kg sec)

[HTO] Tritium libre (Bq/L)

[PS/PF] Rapport : poids sec/poids frais (kg sec/kg frais)

3.2 Carbone 14

3.2.1.1 Rappel des principales propriétés du carbone 14

Dans la biosphère terrestre, le carbone est constitué de 2 isotopes stables : le carbone 12 (98,9 %) et le carbone 13 (1,1 %) et d'une quantité infime (en masse) de carbone 14, son principal radio-isotope. Dans l'environnement, le ^{14}C peut se trouver sous forme de carbone minéral (dioxyde de carbone CO_2 , méthane CH_4 , carbonates...) ou de matières organiques.

Les végétaux incorporent le carbone présent dans le gaz carbonique de l'air par photosynthèse et élaborent leur matière organique à partir de cette source de carbone. Les herbivores incorporent le carbone par l'ingestion de végétaux et les carnivores ou omnivores, à leur tour, ingèrent et incorporent le carbone de leur alimentation. Le carbone devient ainsi partie intégrante de tous les organismes vivants. L'activité spécifique de la biosphère terrestre est globalement en équilibre avec celle du CO_2 atmosphérique. En milieu aquatique, le carbone se trouve sous des formes organiques et minérales (CO_2 dissous, carbonates et surtout bicarbonates) et, contrairement au cas du milieu terrestre, le ^{14}C des écosystèmes d'eau douce n'est pas en équilibre avec le CO_2 atmosphérique, en fonction de l'enrichissement ou de l'appauvrissement en ^{14}C du système des carbonates. Les voies de transfert aux végétaux puis aux animaux sont néanmoins similaires (photosynthèse puis ingestion).

Il est d'usage de mesurer l'*activité spécifique* qui est le rapport isotopique $^{14}\text{C}/\text{C}$, exprimé en becquerels de ^{14}C par kilogramme de carbone total. Une méthode utilisée pour cette mesure et développée à l'IRSN est la suivante : l'échantillon sec (lyophilisé), est calciné et le gaz carbonique (CO_2) issu de cette combustion est transformé en benzène (C_6H_6) dont l'activité est ensuite mesurée par scintillation liquide (le résultat est obtenu directement en activité spécifique). Il est aussi possible de mesurer les isotopes du carbone (dont le ^{14}C) par spectrométrie de masse. La mesure de la teneur en carbone de l'échantillon permet d'exprimer le résultat en activité massique (Bq/kg frais).

L'évaluation du comportement du ^{14}C est basée sur l'hypothèse consensuelle et, en milieu terrestre, vérifiée par les mesures environnementales, que l'activité spécifique $^{14}\text{C}/\text{C}$ est constante dans les composantes de l'environnement, en négligeant notamment la très faible discrimination isotopique qui se produit lors de la photosynthèse. Hors de l'influence d'une installation, cette valeur $^{14}\text{C}/\text{C}$ ne dépend ni de la matrice ni de la situation géographique en tant que telles, mais peut présenter une variabilité naturelle qui est fonction à la fois de la variation des teneurs en CO_2 de l'air⁸ et de la production cosmogénique de ^{14}C (Roussel-Debet, 2007). C'est la raison pour laquelle on admet qu'un seul type d'échantillon, typiquement des feuilles d'arbre à feuillage caduc⁹, permet de représenter correctement le bruit de fond en milieu terrestre.

Hors de l'influence d'une installation nucléaire, l'activité spécifique du ^{14}C dans la biosphère se situe actuellement (2007-2009) autour de 237 Bq $^{14}\text{C}/\text{kg C}$. Cette activité spécifique subit, depuis la décennie 1960, une lente décroissance vers sa valeur naturelle (bruit de fond pré-industriel : 226 Bq/kg C en 1950) depuis l'arrêt des essais nucléaires atmosphériques (figure 7) ; l'augmentation du dioxyde de carbone (CO_2) dans l'air, en relation avec

⁸ L'émission du CO_2 provenant de combustibles fossiles (pétrole, gaz...), par exemple en milieu urbain, tend à diminuer le rapport $^{14}\text{C}/\text{C}$ car ces combustibles sont suffisamment anciens pour que le ^{14}C y ait disparu par décroissance radioactive ; par ailleurs, la teneur en CO_2 de l'air fluctue naturellement.

⁹ Arbres renouvelant leurs feuilles chaque année, ce qui permet de considérer que les feuilles prélevées représentent l'activité spécifique du milieu ambiant qui a prévalu durant l'année de leur formation (création de matière organique).

l'utilisation des combustibles fossiles dans lesquels le carbone 14 a disparu par décroissance radioactive, tend à faire diminuer l'activité spécifique du carbone 14 de l'atmosphère, en augmentant la proportion de carbone stable du CO₂.

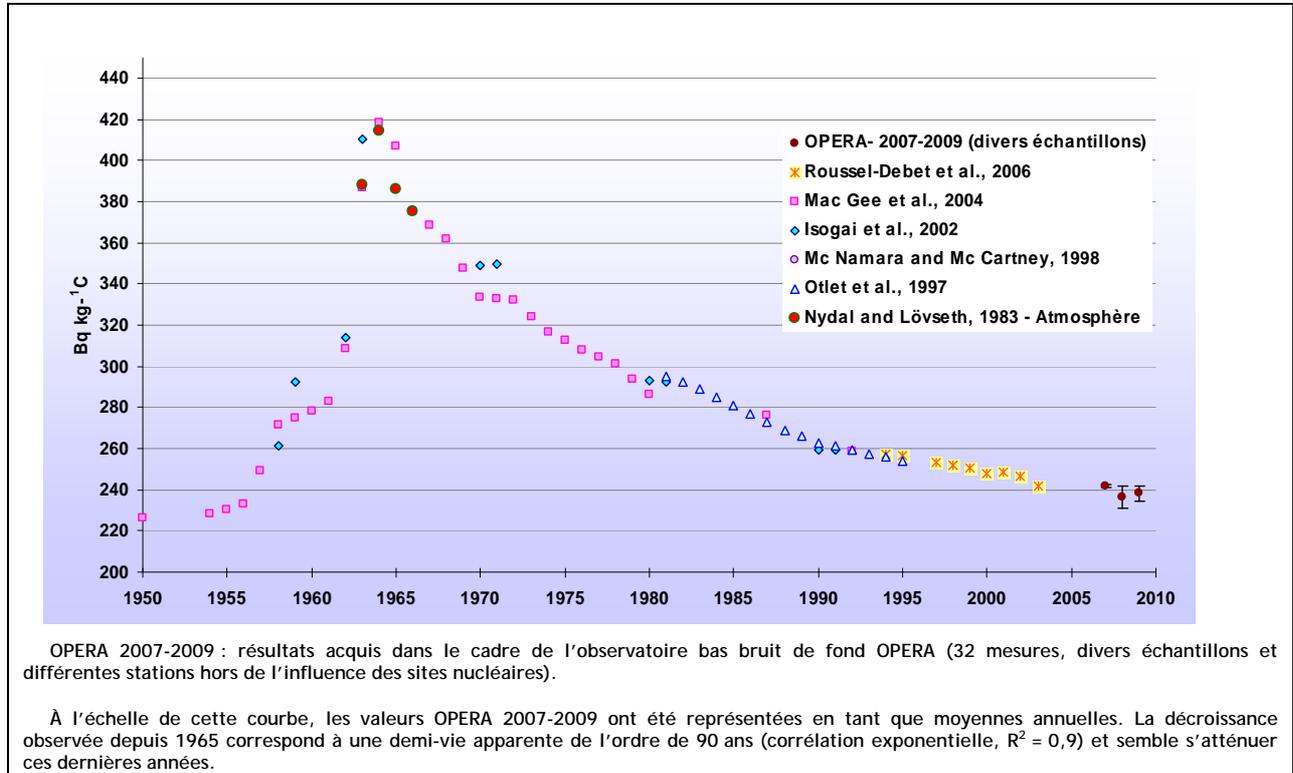


Figure 7. Courbe générale d'évolution du ¹⁴C dans la biosphère terrestre (mise à jour : juillet 2010).

3.2.1.2 Activité spécifique et activité massique

Connaissant l'activité spécifique du carbone (Bq ¹⁴C /kg C) des composantes de la biosphère terrestre (végétaux ou produits animaux...) ainsi que la proportion de carbone des produits alimentaires (kg C/kg frais), il est possible de calculer l'activité massique (Bq ¹⁴C/kg frais) des denrées, qui est le produit des termes précédents. Elle est d'autant plus élevée que le produit est riche en carbone (sucres, huiles, céréales...). Cette estimation est reportée au tableau 9, pour quelques denrées et pour l'activité spécifique moyenne de 237 Bq/kg C, mesurée en France de 2007 à 2009. Une estimation similaire peut être faite pour toute autre valeur d'activité spécifique du carbone.

Tableau 9. Proportion de carbone de quelques denrées et estimation de leur activité massique moyenne en ¹⁴C, en zone non influencée.

Denrée	Proportion de carbone des denrées en kg C/kg frais (IAEA, 2010)	Estimation de l'activité massique des denrées en Bq/kg frais pour un bruit de fond de 237 Bq/kg C
Légumes feuilles et légumes fruits	0,030	7
Légumes-racines	0,046	11
Céréales	0,390	92
Lait (de vache)	0,065	15
Viande (bœuf)	0,200	47

3.2.1.3 Résultats des mesures du carbone 14 autour de Marcoule

Sur 4 prélèvements de feuilles de peupliers situés autour du site, le ^{14}C a été mesuré en 2009 ; le point le plus proche au sud du site a fait l'objet d'un nouveau prélèvement en 2010, ainsi que deux autres échantillons situés à Pont-St-Esprit et à St-Laurent des arbres (figure 8 et tableau 10).

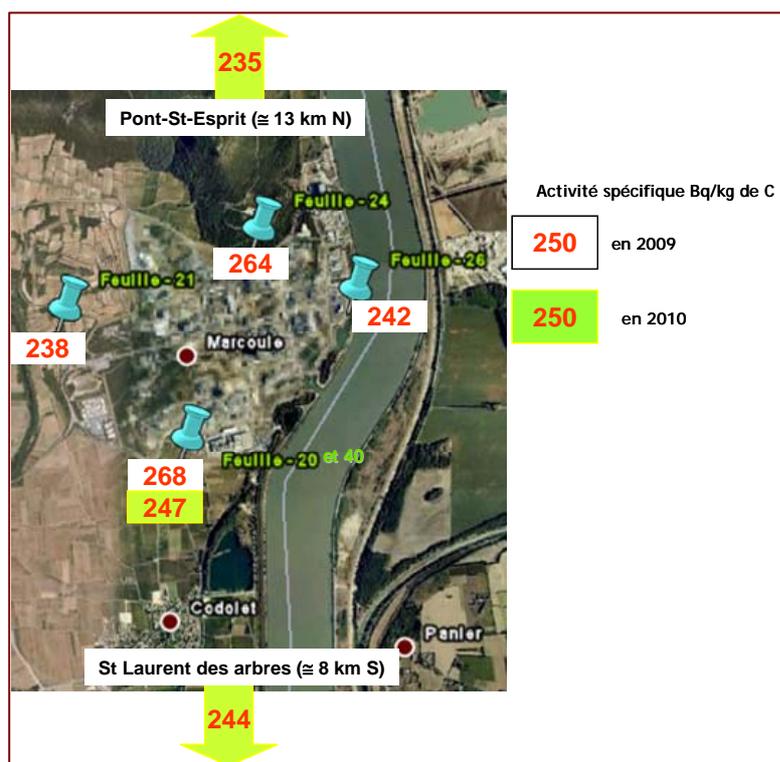


Figure 8. Localisation des peupliers autour de Marcoule sur lesquels des feuilles ont été prélevées pour la mesure du ^{14}C .

Tableau 10. Activité spécifique et activité massique du ^{14}C des feuilles de peupliers prélevées autour de Marcoule.

N°	Date de prélèvement	Station	Bq/kg C	Bq/kg sec	Bq/kg frais
20	01/07/2009	Marcoule 1	268 ± 1,7	126 ± 0,8	45 ± 0,3
21	01/07/2009	Marcoule 2	239 ± 1,3	111 ± 0,6	44 ± 0,2
24	02/07/2009	Belvédère	264 ± 1,7	126 ± 0,8	43 ± 0,3
26	02/07/2009	Station de rejet - clôture Sud	242 ± 1,3	118 ± 0,6	41 ± 0,2
38	08/06/2010	Saint Laurent des Arbres	244 ± 1,3	109 ± 0,6	38 ± 0,2
40	08/06/2010	Marcoule 1	247 ± 1,3	107 ± 0,6	36 ± 0,2
43	08/06/2010	Pont St Esprit	235 ± 1,3	112 ± 0,6	37 ± 0,2

a - Résultats 2009

Par rapport au bruit de fond métropolitain (naturel et rémanent) relevé à la même période ($\cong 237$ Bq/kg C), on constate un enrichissement au sud ($268 \pm 1,7$ Bq/kg C) et au nord du site ($264 \pm 1,7$ Bq/kg C) ; en revanche il n'y a pas de différence significative entre les valeurs mesurées dans les prélèvements situés à l'ouest ou à l'est du site et le bruit de fond du ^{14}C . Ces résultats sont totalement cohérents avec la rose des vents du site et témoignent d'un renforcement du bruit de fond par des rejets de carbone 14 de l'année du prélèvement : les échantillons prélevés sont des feuilles annuelles, il ne peut donc pas s'agir de rémanence.

Les données acquises en 2009 autour du site de Pierrelatte-Tricastin sur divers végétaux annuels (Claval, 2010) sont du même ordre de grandeur : on relève une activité spécifique¹⁰ de 269 ± 17 Bq/kg C au sud immédiat de ce site et une valeur plus faible, de l'ordre du bruit de fond à quelques km au sud du site (donc à une dizaine de km au nord de Marcoule) ; ceci montre que, contrairement au cas du tritium, l'influence des rejets de Marcoule en carbone 14 reste limitée au voisinage du site vers le Nord (quelques km).

b - Résultats 2010

Le carbone 14 mesuré en 2010 dans le prélèvement situé au sud immédiat de Marcoule ($247 \pm 1,3$ Bq/kg C) est nettement plus faible qu'en 2009 ; les valeurs obtenues à Pont-St-Esprit et à St-Laurent-des-Arbres sont respectivement de $235 \pm 1,3$ et $244 \pm 1,3$ Bq/kg C. Pour l'année 2010, on peut considérer qu'en moyenne annuelle, le bruit de fond hors installation est de 235 Bq/kg C. On constate donc un léger renforcement de l'activité spécifique du carbone 14 au sud du site, qui reste encore sensible à une dizaine de km, alors que vers le nord à cette distance, les valeurs mesurées sont de l'ordre du bruit de fond.

Ces données seront complétées par les résultats des mesures en cours d'acquisition sur 7 échantillons de feuillages prélevés sur le reste de la vallée.

3.2.2 Étude particulière des sols et des bio-indicateurs au voisinage de Marcoule.

3.2.2.1 Échantillons de sols

Les échantillons de sol prélevés au voisinage de Marcoule (figure 9) ont été mesurés par spectrométrie gamma et, pour certains d'entre eux, après séparations radiochimiques, par spectrométrie alpha (mesure du plutonium 238, 239 et 240 et de l'américium 241) ainsi que par comptage bêta pour la mesure du ^{90}Sr . Les résultats obtenus pour les radionucléides mesurés au-dessus de la limite de détection sont reportés au tableau 11. Les limites de détection moyennes observées sur les sols pour les autres radionucléides sont reportées au tableau 12.

¹⁰ La différence entre les incertitudes sur les valeurs émanant de chacune des études tient au fait que dans l'étude Rhône le ^{14}C est mesuré par AMS (spectrométrie de masse) et par la méthode « synthèse de benzène » dans l'étude Tricastin-Pierrelatte. Dans le premier cas il est vraisemblable que les incertitudes soient sous-estimées et inversement surestimées dans le second cas (Gurriaran, communication personnelle).

Tableau 11. Résultats de mesure des sols prélevés autour de Marcoule (Bq/kg de sol sec tamisé à 2 mm).

Date de prélèvement	N°	Station	Sol	Strate (cm)	Spectrométrie gamma						Sr90	Spectrométrie alpha		
					K40	Famille Th232	Famille U238		I129 ¹¹	Cs137		Am241	Pu238	Pu239+240
						Ac228	Th234	Pb210						
21/04/2009	2	Les Granges Arnaud - Codolet	non cultivé	0-5	460 ± 50	32 ± 5	26 ± 5	61 ± 8	13,0 ± 1,8	13,0 ± 1,4	1,32 ± 0,4	0,365 ± 0,026	0,0738 ± 0,0037	0,499 ± 0,016
21/04/2009	5	Grange Chabert - Codolet	non cultivé	0-5	620 ± 70	47 ± 6	41 ± 7	61 ± 8	3,8 ± 0,7	12,9 ± 1,3	1,06 ± 0,5	0,103 ± 0,008	0,012 ± 0,001	0,243 ± 0,009
				5-10	640 ± 70	47 ± 6	41 ± 5	61 ± 7	5,3 ± 0,8	21,7 ± 2,1	1,67 ± 0,6	0,194 ± 0,013	0,024 ± 0,002	0,453 ± 0,016
				10-15	670 ± 70	50 ± 7	46 ± 8	61 ± 8	4,0 ± 0,7	19,2 ± 1,9	1,84 ± 0,6	0,189 ± 0,013	0,017 ± 0,002	0,432 ± 0,014
				15-20	670 ± 70	49 ± 6	35 ± 5	49 ± 6	1,3 ± 0,5	11,2 ± 1,2	1,48 ± 0,7	0,142 ± 0,012	0,014 0,002	0,361 ± 0,013
21/04/2009	7	Barrage de Caderousse - rive gauche	forestier	0-5	620 ± 70	26 ± 4	22 ± 4	92 ± 10	3,5 ± 0,6	47,0 ± 5,0	< 0,7	0,080 ± 0,006	0,0161 ± 0,001	0,112 ± 0,005
21/04/2009	8	Le Panier - Caderousse Nord	non cultivé	0-5	440 ± 50	31 ± 4	23 ± 6	63 ± 8	4,3 ± 0,7	21,8 ± 2,1	2,12 ± 0,6	0,154 ± 0,010	0,0126 ± 0,0014	0,366 ± 0,014
				5-10	490 ± 50	33 ± 5	27 ± 5	50 ± 6	3,6 ± 0,6	19,9 ± 1,9	1,72 ± 0,5	0,163 ± 0,012	0,0118 ± 0,0013	0,382 ± 0,014
26/08/2009	33	Cimetière de Codolet	cultivé	0-10	540 ± 70	42 ± 6	32 ± 4	59 ± 7	4,9 ± 0,7	16,3 ± 1,6	1,03 ± 0,6	0,097 ± 0,007	0,0095 ± 0,0010	0,234 ± 0,008
					570 ± 60	45 ± 6	36 ± 7	51 ± 7	3,9 ± 0,7	14,0 ± 1,4	1,46 ± 0,6	0,088 ± 0,007	0,0091 ± 0,0010	0,234 ± 0,009
26/08/2009	35	Grange Chabert - Codelet sud -	cultivé	0-10	640 ± 70	44 ± 6	34 ± 5	52 ± 6	nd	11,8 ± 1,2	0,90 ± 0,5	0,069 ± 0,006	0,0059 ± 0,0009	0,157 ± 0,006
				10-20	630 ± 70	50 ± 7	42 ± 6	52 ± 7	nd	16,9 ± 1,7	1,16 ± 0,6	0,082 ± 0,007	0,0064 ± 0,0009	0,191 ± 0,008

nd : non détecté

nm : non mesuré

¹¹ Re-mesure γ par transmission après constatation de l'existence d'un pic correspondant à ce radio-isotope.



Figure 9. Localisation des prélèvements de sols autour de Marcoule.

Tableau 12. Limites de détection moyennes observées sur les sols (présente étude)

	Radionucléides naturels		Radionucléides artificiels							
	Be7	Na22	Ag110m	Co57, Co58, Co60	Cs134	Eu154	Mn54	Rh106	Sb124	Sb125
LD (Bq/kg sec)	134	0,9	1,5	0,6	0,6	0,7	1,6	8,6	10	1,7

a - Radionucléides d'origine naturelle

Les concentrations du potassium 40 (radionucléide d'origine naturelle), qui vont de 440 à 670 Bq/kg sec, se situent dans la gamme des valeurs habituellement observées. Le plomb 210 (^{210}Pb , chaîne de ^{238}U), très fluctuant de par son comportement, qui résulte du dépôt d'aérosols de descendants du radon, varie de 50 à 92 Bq/kg sec. La mesure par spectrométrie gamma du thorium 234 (^{234}Th), descendant de l'uranium 238, et de l'actinium 228 (^{228}Ac), descendant du thorium 232, permet, dans les sols, de déduire ¹² la valeur des radioéléments tête de série respectifs (^{238}U et ^{232}Th). De plus, il est possible de calculer la concentration pondérale en uranium naturel ¹³ (à partir de la mesure du ^{234}Th), si l'on peut penser qu'il n'existe pas de déséquilibre isotopique entre les isotopes constitutifs de l'uranium

¹² En effet, on considère habituellement qu'au sein de l'échantillon mesuré, lorsque les périodes des têtes de série sont suffisamment supérieures à celles de leurs descendants, les activités de ces éléments fils sont égales à celles de leurs radioéléments tête de série respectifs.

¹³ Avec l'hypothèse suivante : si a est l'activité massique mesurée de ^{234}Th (Bq/unité de masse de l'échantillon), l'échantillon contient une masse de ^{238}U égale à : $a \times 8,1 \times 10^{-5}$ g/unité de masse de l'échantillon, le facteur $8,1 \times 10^{-5}$ étant l'inverse de l'activité spécifique de l'isotope ^{238}U (g/Bq). Cette masse représente une fraction égale à 0,993 fois la masse de l'uranium naturel (U) de l'échantillon, soit un facteur de conversion de $a \times 8,2 \times 10^{-5}$ g U/unité de masse de l'échantillon.

Dans les sols prélevés dans le cadre de la présente étude, les concentrations en ^{228}Ac varient de 26 à 50 ± 5 Bq/kg sec ; celles du ^{234}Th varient de 22 à 46 Bq/kg sec, ce qui est théoriquement équivalent à une concentration massique de 0,003 g/kg sec d'uranium naturel. Ces valeurs sont dans la fourchette de celles observées en métropole hors de toute zone d'influence d'installation (tableau 13).

Tableau 13. Niveaux d'activité de certains radionucléides des chaînes uranium - thorium observés dans les sols en France.
(selon Leroux, 2007)

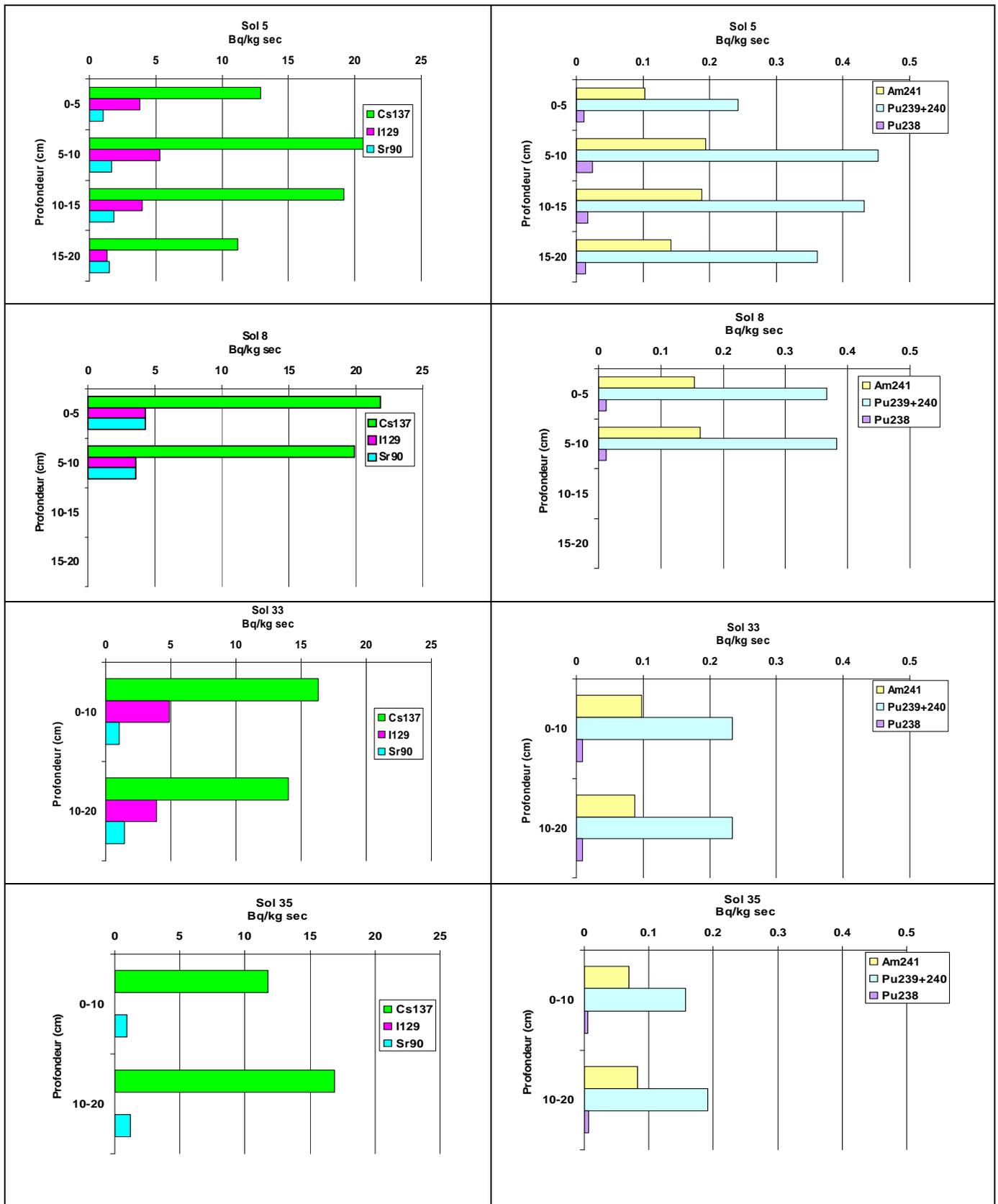
^{228}Ac (Bq/kg sec) considéré comme équivalent à Th232	^{234}Pa ou ^{234}Th (Bq/kg sec) considéré comme équivalent à ^{238}U	Équivalent en U naturel en g/kg sec
40 (20 à 60)	39 (30 à 70)	calculé 0,003 (0,002 à 0,006) mesuré en moyenne en France : 0,003

b - Radionucléides d'origine artificielle

Les schémas de répartition des radionucléides selon la profondeur de prélèvement sont indiqués figure 10.

Le césium 137 (^{137}Cs) est détecté à des niveaux allant de 12 ± 1 à 47 ± 5 Bq/kg sec, variant avec le type de sol. Dans les sols cultivés, les concentrations sont voisines de 15 Bq/kg sec, avec des activités massiques similaires dans les 2 strates échantillonnées, ce qui est cohérent avec les labours qui tendent à homogénéiser les radionucléides. Les sols non cultivés, présentent comme cela est observé habituellement des concentrations plus élevées : 13 à 22 Bq/kg sur la strate superficielle (0-5 cm) et jusqu'à 47 Bq/kg sec pour le sol forestier (n° 7). Par rapport aux observations faites antérieurement (notamment : Descamps, 1997 ; Duffa, 2003...) ces valeurs ne présentent aucune anomalie comme l'indique sommairement la figure 11 qui visualise la gamme de l'activité moyenne de sols prélevés au voisinage de Marcoule à diverses dates, en comparaison avec celle de la présente étude. Il a été montré au cours de ces études antérieures que le césium 137 des sols de cette zone est essentiellement lié aux retombées de l'accident de Tchernobyl et des essais atmosphériques d'armes nucléaires (« tirs »).

Le strontium 90 (^{90}Sr) qui est issu des retombées des tirs atmosphériques, est mesuré à des niveaux moyens de 1,6 Bq/kg sec en sol non cultivé et de 1,1 Bq/kg sec en sol cultivé, ce qui se situe dans la gamme des valeurs acquises ces dernières années dans les strates supérieures des sols (cf. figure 11).



5 : Grange Chabert (non cultivé) ; 8 Le Panier (non cultivé) ; 33 Codolet (cultivée) ; 35 Grange Chabert (cultivée)
 Figure 10. Répartition des radionucléides artificiels mesurés dans les sols.

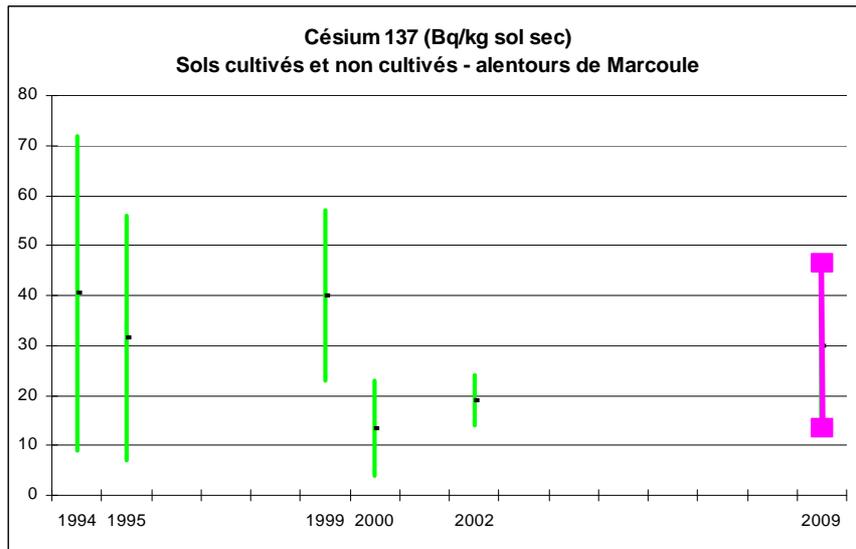


Figure 11. Gammes d'activités en ^{137}Cs des échantillons de sols prélevés aux alentours de Marcoule par l'IRSN dans le cadre de différentes études.

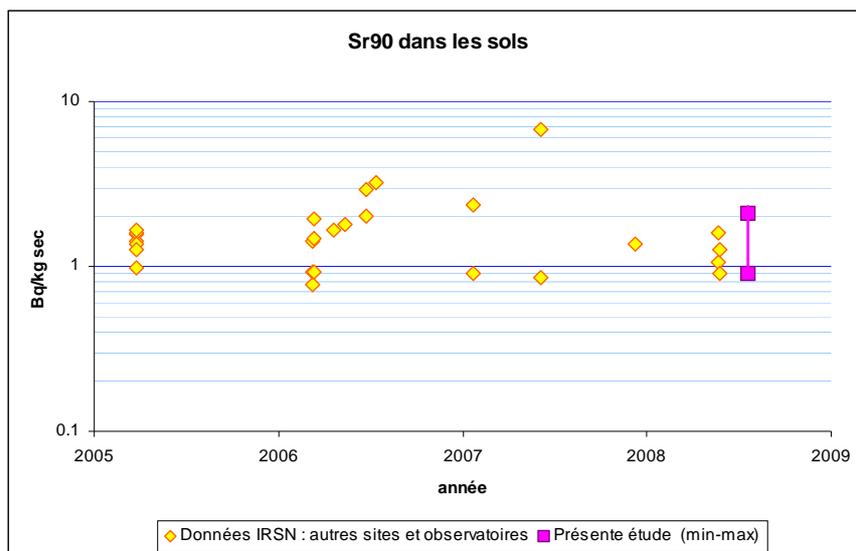


Figure 12. Gamme d'activités en ^{90}Sr des sols prélevés aux alentours de Marcoule comparée aux valeurs habituellement mesurées dans les sols en France.

L'iode 129 (^{129}I) a été détecté dans la plupart des échantillons de sols. Les niveaux sont de l'ordre de 1 à 5 Bq/kg sec. Un échantillon (sol non cultivé N°2, strate de surface 1-5 cm) présente une valeur plus élevée : $13 \pm 1,8$ Bq/kg sec. L'iode 129 a été rejeté dans l'atmosphère au cours des essais atmosphériques d'armes nucléaires (environ 0,4 TBq) et localement par les installations de retraitement de combustible de Marcoule : en 1995, les rejets annuels étaient d'environ 40 GBq ; les rejets ont diminué à partir de l'arrêt du retraitement en 1997 et sont actuellement de l'ordre de quelques dizaines de MBq/an. Un marquage de l'environnement proche avait été observé en 1995 (4 à 100 Bq/kg frais dans le thym et 270 Bq/kg sec dans les bryophytes, cf. Descamps, 1997). Les niveaux mesurés dans des échantillons de végétaux prélevés en 1999 sur cette zone variaient entre la limite de détection (moins de 0,5 Bq/kg sec) pour le thym, le romarin et les feuilles de chênes à 7 Bq/kg sec dans des graminées (Duffa et Fréchu, 2003). À notre connaissance, aucune mesure de sol n'avait été alors réalisée. Il

n'est donc pas possible de situer les valeurs obtenues en 2009 sur les sols par rapport à d'autres résultats de mesures antérieures.

Néanmoins, en 2009, l'iode 129 n'a pas été détecté dans les végétaux, prélevés au même endroit que les sols en question ou à proximité – en particulier, le thym, qui est un bio-indicateur persistant dont les feuilles retiennent bien la contamination aérienne comme les mousses muricoles, pas plus que dans la salade ou le raisin (cf. paragraphe 3.2.2.). De ce fait il est probable que l'iode 129 encore présent dans les sols proches du site est une rémanence d'une contamination ancienne.

Les actinides transuraniens, américium 241 (^{241}Am), et plutonium (^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$), qui proviennent des retombées des tirs atmosphériques¹⁴ et des rejets anciens des installations de retraitement de combustibles, ont été recherchés par spectrométrie alpha. Les sols ont été prélevés sur les zones où des échantillons avaient déjà été prélevés en 1999 et 2000 (Duffa, 2001), afin de disposer d'éléments de comparaison.

Les niveaux mesurés sont cohérents avec les résultats des mesures antérieures. Ils vont de : $0,07 \pm 0,006$ à $0,37 \pm 0,03$ Bq/kg sec pour ^{241}Am , de $0,016 \pm 0,001$ à $0,074 \pm 0,004$ pour ^{238}Pu et de $0,11 \pm 0,005$ à $0,50 \pm 0,01$ pour $^{239+240}\text{Pu}$.

Bien qu'il soit délicat de comparer ex-abrupto les mesures de 2000 et celles de 2009 car les points de prélèvement ne sont pas toujours exactement aux mêmes endroits et les hauteurs de strates prélevées diffèrent, nous avons reporté sur la figure 13 les valeurs moyennes des concentrations des strates supérieures des sols cultivés et non cultivés. Ces concentrations apparaissent en diminution sensible par rapport aux échantillons d'il y a 10 ans, de façon plus prononcée dans les sols non cultivés que dans les sols cultivés ; cette diminution apparente ne s'explique pas par la décroissance radioactive, sauf dans une faible mesure¹⁵ pour le ^{238}Pu ; elle correspond peut-être à une migration verticale – notamment lors des pluies orageuses par la migration des colloïdes dans les fentes de dessiccation. Cette explication est néanmoins incertaine en raison, d'une part, des incertitudes mentionnées ci-dessus en ce qui concerne la difficulté de comparer les deux séries de valeurs 2000 et 2009 et, d'autre part, de la variabilité du comportement des actinides dans les sols (e.g., Roussel-Debet et al., 2002 ; Roussel-Debet, 2005).

¹⁴ Une faible part du ^{238}Pu provient de la chute du satellite SNAP-9A en 1964 (dissémination de 100 TBq, majoritairement sur l'hémisphère sud).

¹⁵ La décroissance radioactive du plutonium 238 (période 87,7 ans) en 10 ans se traduit par une diminution de l'activité initiale de 10 %. Les autres radionucléides ne sont pas sujets à une décroissance significative durant ce laps de temps, en raison de leur très longue période radioactive. Par ailleurs, l'américium 241 qui provient du ^{241}Pu (période 14,4 ans) augmente au fil du temps.

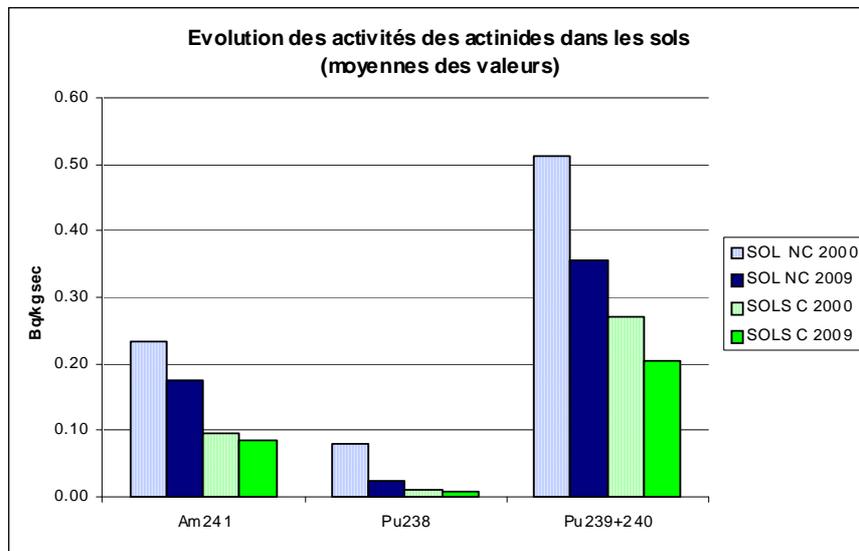


Figure 13. Évolution de l'activité moyenne en actinides transuraniens des sols prélevés aux alentours de Marcoule.

sol NC : sol non cultivé
sol C : sol cultivé

Les rapports isotopiques observés sur les sols prélevés en 2009 sont reportés au tableau 14 et schématisés figure 14.

L'origine des isotopes de plutonium, d'américium et de strontium peut être attribuable aux retombées des tirs (et du satellite SNAP-9A pour le ^{238}Pu) et aux anciens rejets de l'usine de Marcoule, comme cela a été exposé en détail par Duffa (2001). Le ^{137}Cs est imputable aux dépôts rémanents des tirs et aux retombées de l'accident de Tchernobyl.

Le rapport $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ qui exprime la « signature isotopique » de l'origine du plutonium présente toujours les anomalies qui avaient été observées : il est partout supérieur à celui théorique des tirs (i.e., 0,03), ce qui confirme que le plutonium présent dans les sols autour de Marcoule n'est pas uniquement imputable à cette origine. Pour 2 des échantillons (sols N°2 et 7, rapport isotopique de l'ordre de 0,14 à 0,15), le plutonium provient en majorité des rejets historiques provenant du retraitement de combustible qui s'effectuait sur le site jusqu'en 1997. Dans les autres cas, le plutonium mesuré actuellement témoigne d'une rémanence du marquage lié à la production de plutonium militaire des années 60-70.

À l'exception du sol N°2, les rapports isotopiques $^{137}\text{Cs}/^{239+240}\text{Pu}$ sont plus élevés que ceux spécifiques aux retombées des tirs, ce qui est en accord avec la double origine du césium (retombées des tirs et de l'accident de Tchernobyl), en particulier sur le sol forestier (N°7). Les rapports isotopiques $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ sont quant à eux 4 à 9 fois plus élevés que la valeur théorique actuelle du rapport isotopique initial des tirs atmosphériques (actuellement environ 1,7) du fait qu'une grande partie du césium 137 de cette région est issue des retombées de Tchernobyl, et secondairement, en raison d'une migration verticale bien plus rapide du strontium que du césium. Les rapports $^{90}\text{Sr}/^{239+240}\text{Pu}$ sont eux aussi différents – 3 à 4 fois plus faibles – de ceux théoriques des tirs (i.e., 19) ce qui est également imputable à une migration encore plus rapide du ^{90}Sr par rapport au plutonium qui migre peu.

Tableau 14. Rapports isotopiques observés dans les échantillons de sols prélevés aux alentours de Marcoule.

Localisation	N° (type)	Profondeur (cm)	$^{137}\text{Cs}/^{239+240}\text{Pu}$	$^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$	$^{239+240}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$	$^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$	$^{90}\text{Sr}/^{239+240}\text{Pu}$
1,1 km S	2 (non cultivé)	0-5	26	0,148	0,4	9,9	2,6
2,9 km S	5 (non cultivé)	0-5	53	0,048	0,2	12,1	4,4
		5-10	48	0,053	0,3	13,0	3,7
		10-15	44	0,040	0,2	10,4	4,3
		15-20	31	0,039	0,2	7,6	4,1
3,5 km S-SE	7 (forestier)	0-5	421	0,144	1,4	(Sr < LD)	(Sr < LD)
2.2 km S-SE	8 (non cultivé)	0-5	60	0,034	2,4	10,3	5,8
		5-10	52	0,031	2,3	11,6	4,5
1 km S	33 (cultivé)	0-10	70	0,040	2,4	15,8	4,4
		10-20	60	0,039	2,7	9,6	6,2
2,9 km S-SE	35 (cultivé)	0-10	75	0,037	2,3	13,1	5,8
		10-20	88	0,034	2,3	14,5	6,1
Rapports isotopiques des retombées des tirs (Duffa, 2001) Valeurs calculées à partir des données UNSCEAR de 1982 et corrigées de la décroissance radioactive pour 2009			32	0,03	2,7	1,7	19
Rapports isotopiques du plutonium issu de retraitement du combustible (Duffa, 2001)				Retraitement civil : 0,3 Production de plutonium de qualité militaire : 0,05			

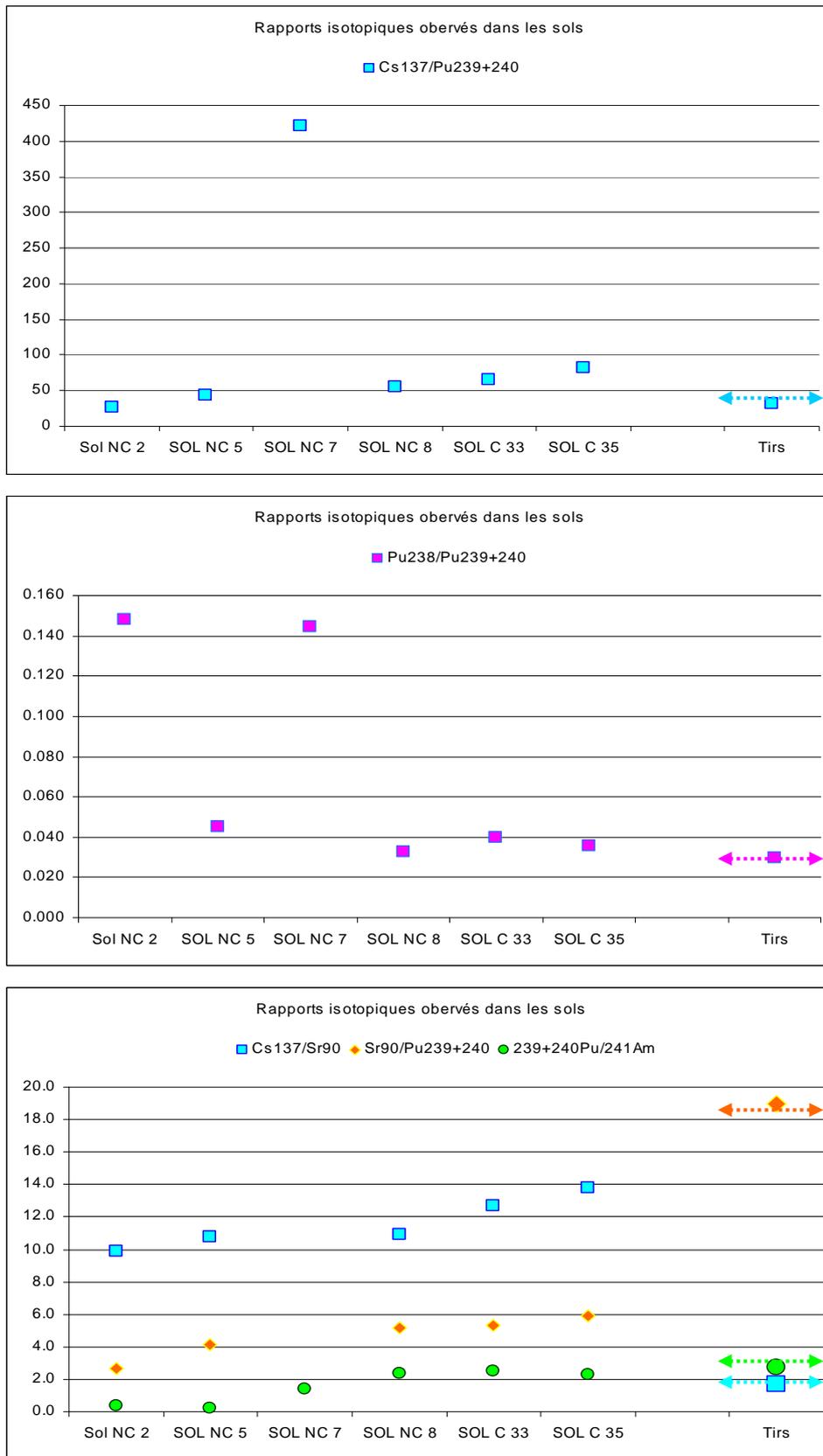


Figure 14. Rapports isotopiques observés dans les sols, comparaison avec les valeurs caractéristiques des retombées des tirs.

3.2.2.2 Échantillons de végétaux

Pour compléter les mesures précédentes, quelques végétaux ont été prélevés aux mêmes endroits que les sols ou à proximité immédiate de ces prélèvements, cf. figure 15 et tableau 15.

Les bryophytes (mousses, prélevées ici sur des murs), de par leur surface apte à retenir les dépôts et grâce à leur longévité, sont des indicateurs qualitatifs d'un dépôt atmosphérique, qui peut être lié à la remise en suspension de particules de sol ; effectivement, on constate que chacun des deux échantillons de mousses a des concentrations similaires en ^{228}Ac et ^{234}Th , ce qui signe un apport de poussières provenant du sol. On note également une teneur élevée en ^{210}Pb et en ^7Be (dépôt atmosphérique). L'échantillon N°1, prélevé approximativement à l'endroit où avaient été observées par Duffa (2001) des concentrations relativement élevées d'actinides est 10 à 20 fois plus contaminé en plutonium et en américium que l'échantillon de mousse N°6 et de l'ordre de 100 à 1000 fois plus que les autres végétaux (thym, raisin, salade). Par ailleurs, le thym présente des valeurs relativement élevées en potassium 40 (naturel) comme en césium 137, si on les compare aux valeurs mesurées sur des stations du sud de la France, hors Vallée du Rhône, mais cohérentes avec les mesures effectuées dans la vallée, cf. figure 16.

Les rapports isotopiques $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ présentent encore pour ces échantillons de mousse et de thym, des valeurs allant de 0,04 à 0,26, supérieures à celles théoriques des tirs ; pour le raisin, ce rapport isotopique est proche de 0,03 (0,027) ce qui est probablement lié au fait que l'incorporation racinaire des radionucléides par la vigne s'effectue en profondeur, au delà de la zone où restent les dépôts issus des rejets anciens de Marcoule.



Figure 15. Localisation des prélèvements de végétaux autour du site de Marcoule.

Tableau 15. Résultats de mesure des végétaux prélevés autour de Marcoule (Bq/kg frais).

Date de prélèvement	N°	Station	Échantillon	Naturels telluriques				Naturel cosmogénique
				K40	Famille Th232	Famille U238		Be7
					Ac228	Th234	Pb210	
21/04/2009	1	Cimetière de Codolet	Mousse	373 ± 47	35,4 ± 4,7	34,5 ± 7,5	306 ± 30	322 ± 41
21/04/2009	3	Les Granges Arnaud	Thym	472 ± 48	3,1 ± 0,5	nd	nd	nd
21/04/2009	4	Grange Chabert	Thym	414 ± 45	4,1 ± 0,6	nd	nd	336 ± 45
21/04/2009	6	Grange Chabert	Mousse	173 ± 18	13,3 ± 2,2	12,4 ± 2,2	283 ± 27	182 ± 40
28/07/2009	30	Codolet	Laitue	103 ± 10	0,9 ± 0,2	0,8 ± 0,2	1,5 ± 0,3	7,2 ± 1,9
26/08/2009	32	Cimetière de Codolet	Raisin	69 ± 8	nd	nd	nd	0,7 ± 0,2
26/08/2009	34	Grange Chabert - Codelet sud	Raisin	64 ± 6	nd	nd	nd	0,3 ± 0,1

Date de prélèvement	N°	Station	Échantillon	Cs137	Sr90	Spectrométrie alpha		
						Am241	Pu238	Pu239+240
21/04/2009	1	Cimetière de Codolet	Mousse	159 ± 15	4,3 ± 0,8	1,0E+0 ± 7,0E-2	1,0E-1 ± 4,9E-3	2,6E+0 ± 7,7E-2
21/04/2009	3	Les Granges Arnaud	Thym	0,96 ± 0,11	0,67 0,14	1,3E-2 ± 1,0E-3	1,8E-3 ± 2,7E-4	3,1E-2 ± 2,5E-3
21/04/2009	4	Grange Chabert	Thym	1,14 ± 0,14	0,50 ± 0,11	6,6E-3 ± 6,5E-4	8,5E-4 ± 1,9E-4	1,6E-2 ± 9,7E-4
21/04/2009	6	Grange Chabert	Mousse	19,9 ± 2,2	0,59 ± 0,34	7,5E-2 ± 5,6E-3	1,2E-2 ± 1,5E-3	1,2E-1 ± 5,3E-3
28/07/2009	30	Codolet	Laitue	0,38 ± 0,05	a	1,6E-3 ± 1,5E-4	4,6E-5 ± 1,7E-5	6,6E-4 ± 8,0E-5
26/08/2009	32	Cimetière de Codolet	Raisin	< 0,02	0,05 ± 0,02	2,4E-5 ± 1,6E-5	1,4E-5 ± 1,4E-5	5,3E-5 ± 2,6E-5
26/08/2009	34	Grange Chabert	Raisin	0,016 ± 0,005	nm	nm	nm	nm

a : en attente (sur échantillon complémentaire prélevé en 2010) ; nm : non mesuré ; nd : inférieur à la limite de détection

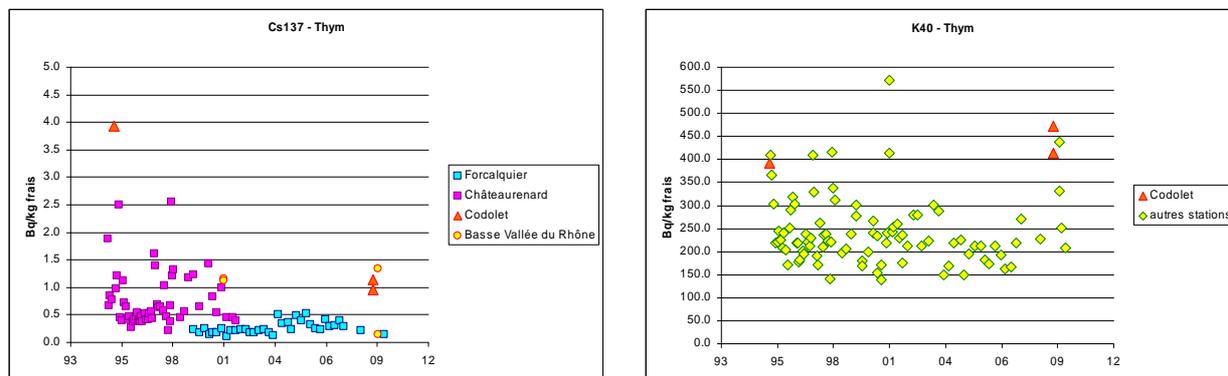


Figure 16. Comparaison des valeurs acquises sur le thym (Codolet 2009) avec divers autres résultats de mesure.

3.2.2.3 Conclusion sur les mesures des sols et bio-indicateurs

Ces résultats montrent que les quelques singularités qui subsistent encore à proximité du site de Marcoule reflètent, comme cela était prévisible, la persistance des contaminations anciennes liées à l'exploitation du site : les sols situés dans la zone sud proche du site et quelques (rares) échantillons végétaux témoignent encore des rejets passés d'actinides transuraniens et, uniquement pour les sols, d'iode 129, sans pour autant constituer des anomalies. Ces données présentent un intérêt en termes d'actualisation des résultats des mesures qui avaient fait l'objet, il y a une dizaine d'années, d'études plus approfondies ; actuellement, comme auparavant, les niveaux d'activité mesurés ne présentent aucun risque sanitaire.

3.3 Autres résultats acquis sur la partie aval de la vallée du Rhône

La figure 17 indique la localisation des zones de prélèvement, sur la partie aval du territoire étudié.

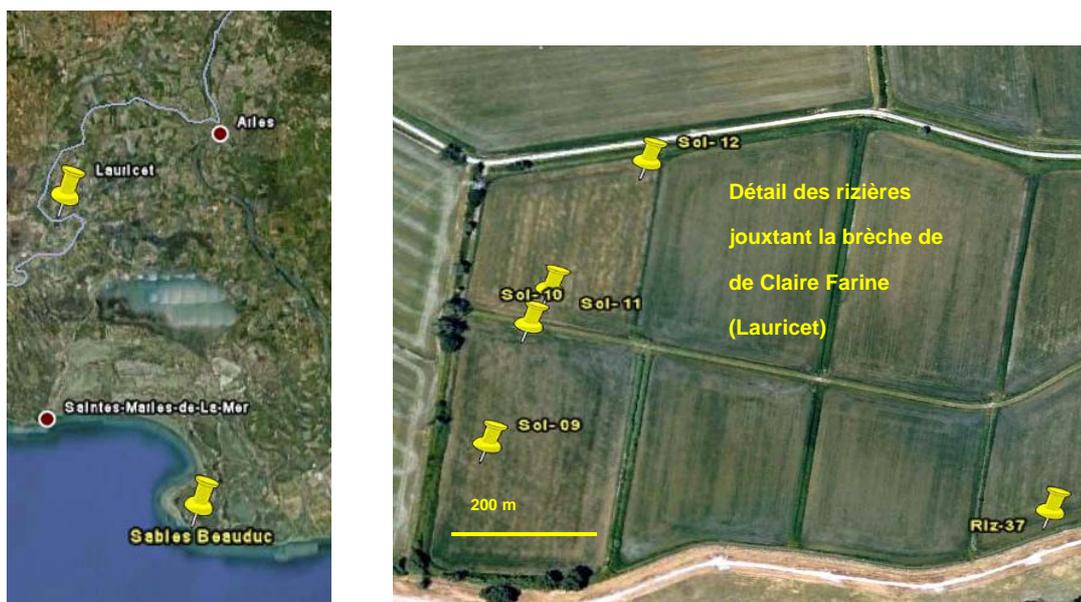


Figure 17. Localisation des prélèvements réalisés en Camargue.

3.3.1 Sables de Camargue

L'IRSN a expertisé en 2003 les « sables noirs radioactifs » des plages de Camargue (Saintes-Maries-de-la-Mer), riches en uranium et en thorium (Pourcelot et Vassas, 2005 ; Vassas et al., 2006). Ces sables présentent des zones plus sombres, appelées « placers », caractérisées par des niveaux d'activité atteignant quelques milliers de Bq/kg en uranium et en thorium, en lien avec une accumulation de minéraux lourds (apatite et zircon). L'étude de 2003 a montré que tous les isotopes des chaînes de l'uranium 238 et du thorium 232 sont à l'équilibre radioactif dans ces minéraux et que la radioactivité de ces sables est d'origine naturelle. Par ailleurs, les données ont prouvé que les minéraux lourds des plages proviennent de l'érosion des roches mères (granite et roches volcaniques) du bassin versant du Rhône.

Des échantillons ont été prélevés en 2009, sur l'une des plages où les concentrations les plus élevées en radionucléides naturels avaient été observées (plage du phare de Beauduc). Les résultats de mesures de spectrométrie gamma (tableau 16) de 3 prélèvements de surface, réalisés respectivement en bas, en milieu et en haut de plage, confirment, comme attendu, les observations antérieures. Les concentrations du ^{228}Ac (famille de ^{232}Th), d'une part, et du ^{234}Th (famille de ^{238}U), d'autre part, sont dans la gamme de valeurs déjà observée

(figure 18) ; le ^{210}Pb et le ^{234}Th sont à l'équilibre (concentrations voisines), tout comme cela avait été déjà observé sur l'ensemble des isotopes de ces familles.

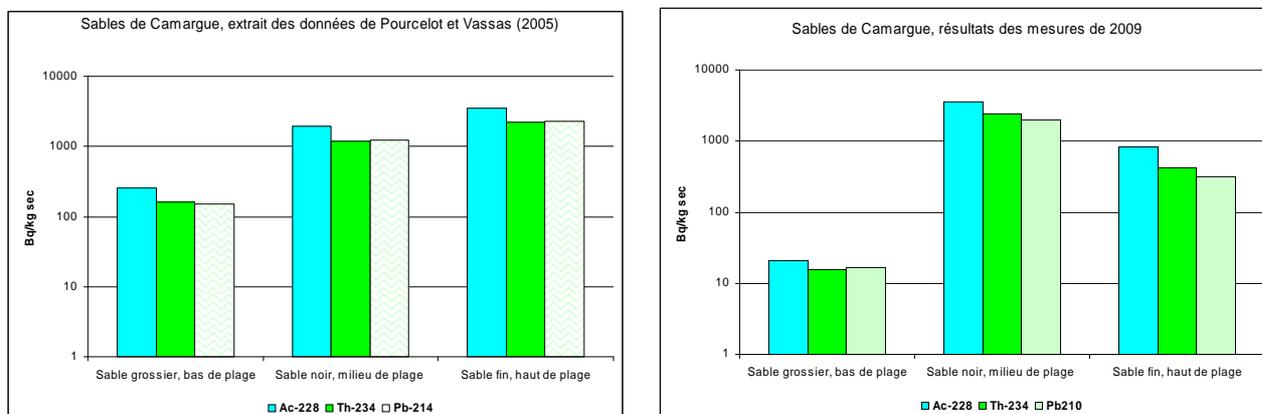


Figure 18. Comparaison des résultats de 2009 avec ceux acquis précédemment.

Tableau 16. Résultats de mesure par spectrométrie gamma des sables de Camargue (Bq/kg sec).

Échantillons prélevés sur la plage du phare de Beauduc le 20/05/2009. Les résultats relatifs aux autres radioisotopes sont tous inférieurs aux limites de détection.

Échantillon	Naturel cosmique Na22	Naturels telluriques			
		K40	Famille Th232 Ac228	Famille U238 Th234 Pb210	
Sable grossier, bas de plage	< 0,7	370 ± 50	21 ± 3	16 ± 2	17 ± 3
Sable noir, milieu de plage	2,9 ± 1,0	37 ± 17	3600 ± 400	2450 ± 230	2010 ± 190
Sable fin, haut de plage	< 1,9	169 ± 21	820 ± 100	420 ± 40	310 ± 30

3.3.2 Riz et sol de Camargue

Le Rhône en aval de Valence a connu en décembre 2003 une crue exceptionnelle, atteignant 13 000 m³/s à Beaucaire. En conséquence la basse vallée du Rhône a subi des inondations par débordement du Rhône et rupture de digues, notamment en Camargue. Ces inondations extrêmes sont à l'origine de flux de sédiments qui constituent l'essentiel de la phase porteuse des radionucléides rejetés auparavant dans le fleuve. Suite à une demande d'expertise spécifique de la CLI du Gard, l'IRSN avait étudié les conséquences de ces épisodes sur le transport des radionucléides vers les sols de la plaine alluviale (Eyrolle et al., 2004).

Quatre échantillons de sol et un échantillon de riz ont donc été prélevés au niveau de la Brèche de Claire Farine (Lauricet) où les sols avaient fait l'objet d'investigations antérieures.

Le tableau 17 présente les résultats des mesures réalisées sur ces échantillons.

Tableau 17. Résultats de mesure par spectrométrie gamma et alpha des sols (Bq/kg sec) et du riz (Bq/kg frais) prélevés au niveau de la Brèche de Claire Farine (Lauricet).

a - sol

Date de prélèvement	N°	Échantillon	Naturels telluriques				Cs137	Sr90
			K40	Famille Th232	Famille U238			
				Ac228	Th234	Pb210		
22/04/2009	9	Sol 0-20 cm	500 ± 50	32 ± 5	24 ± 3	33 ± 4	7,8 ± 0,9	0,31 ± 0,2
22/04/2009	10	Sol 0-20 cm	530 ± 60	28 ± 4	21 ± 3	32 ± 4	5,0 ± 0,6	< 0,6
22/04/2009	11	Sol 0-20 cm	470 ± 50	31 ± 5	29 ± 5	35 ± 5	6,3 ± 0,8	0,79 ± 0,5
22/04/2009	12	Sol 0-20 cm	500 ± 50	35 ± 5	33 ± 6	39 ± 6	7,6 ± 0,8	0,56 ± 0,4

(sol - suite)

Date de prélèvement	N°	Échantillon	Am241	Pu238	Pu239+240	Pu238/Pu239+240
22/04/2009	9	Sol 0-20 cm	0,126 ± 0,010	0,0159 ± 0,0016	0,191 ± 0,008	0,08
22/04/2009	10	Sol 0-20 cm	0,077 ± 0,006	0,0060 ± 0,0010	0,180 ± 0,008	0,03
22/04/2009	11	Sol 0-20 cm	0,101 ± 0,008	0,0119 ± 0,0014	0,160 ± 0,007	0,07
22/04/2009	12	Sol 0-20 cm	0,143 ± 0,010	0,0165 ± 0,0016	0,206 ± 0,008	0,08

b - riz

Date de prélèvement	N°	Station	Échantillon	Naturels telluriques				Cosmogéniques	
				K40	Famille Th232	Famille U238		Be7	Na22
					Ac228	Th234	Pb210		
06/10/2009	37	Lauricet	Riz (grain)	90 ± 9	nd	nd	0,8 ± 0,3	10,8 ± 1,2	nd

(riz- suite)

Date de prélèvement	N°	Station	Échantillon	Cs137	Sr90	Am241	Pu238	Pu239+240
06/10/2009	37	Lauricet	Riz (grain)	0,03 ± 0,02	0,04 ± 0,024	< 1,5E-4	< 1,5E-5	6,0E-5 ± 4,0E-5

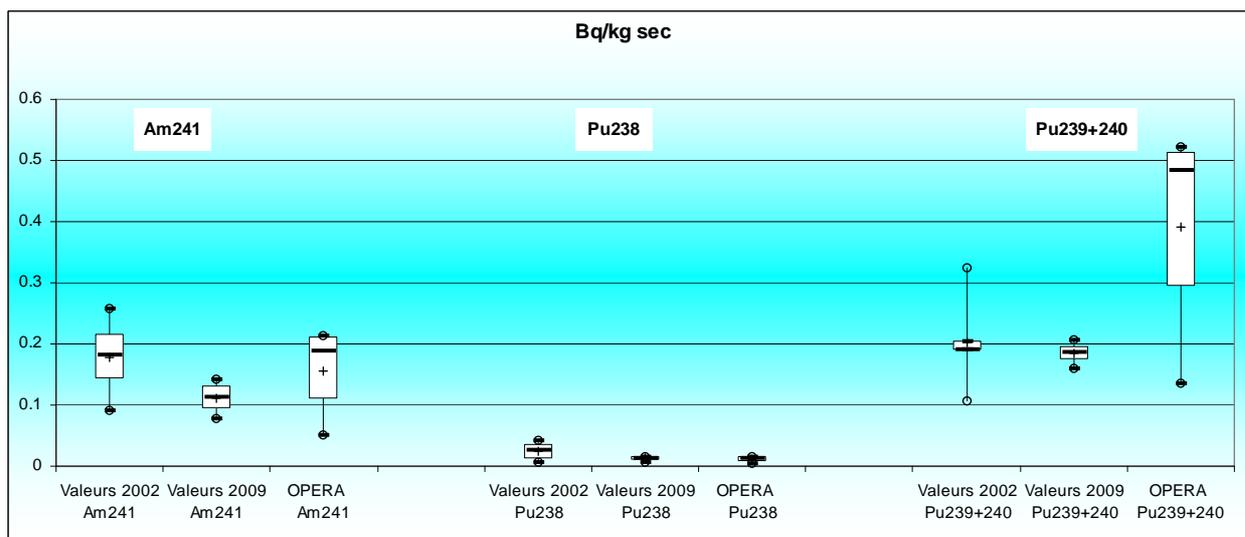
En ce qui concerne les sols, les résultats obtenus sur les 4 prélèvements sont très semblables, ce qui est à mettre en relation avec le mode d'exploitation des rizières (Pey, 2005) dans lesquelles les travaux de labours - nivellement et les cycles de mise en eau et d'assèchement tendent à homogénéiser et lessiver le substrat.

Les radionucléides d'origine naturelle sont dans la gamme des valeurs habituelles, avec une concentration assez faible des uranium et thorium et plutôt élevée du ^{40}K , en lien avec l'origine des sols (sédiments alluviaux du bassin versant du Rhône). Le ^{137}Cs est présent en concentrations faibles (5 à 8 Bq/kg sec) et le ^{90}Sr présente des valeurs habituelles (0,2 à 0,5 Bq/kg sec). En ce qui concerne les transuraniens, qui avaient été l'objet essentiel des études antérieures, les résultats de 2009 peuvent être comparés, d'une part à ceux acquis en 2002 sur des points de prélèvements très proches et, d'autre part, à des résultats acquis de 2002 à 2008 sur différentes stations situées hors influence de site nucléaire (observatoire bas bruit de fond OPERA). Cette comparaison est schématisée figure 19-a, pour ce qui concerne les concentrations massiques des actinides.

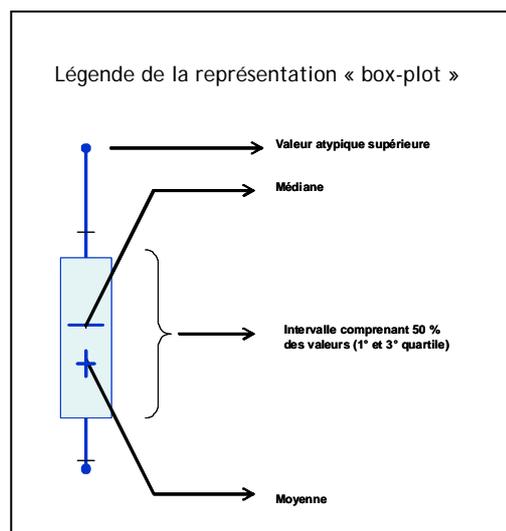
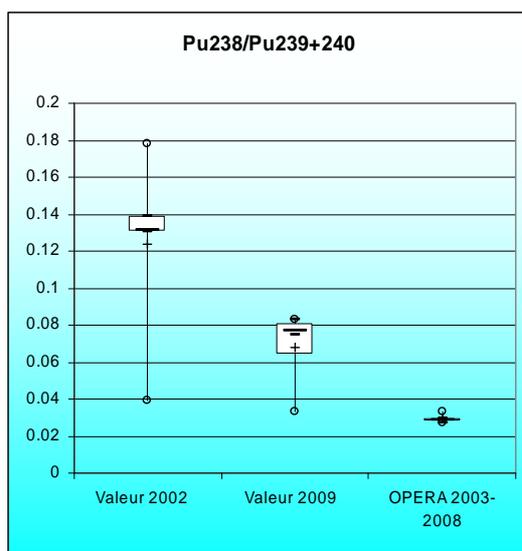
Les concentrations observées en 2009 sont les suivantes (moyenne des 4 prélèvements) : 0,11 Bq/kg sec en ^{241}Am , 0,01 Bq/kg sec en ^{238}Pu et 0,18 Bq/kg sec en $^{239+240}\text{Pu}$; elles sont de l'ordre de grandeur de celles observées dans le cadre de OPERA – quoique légèrement plus fortes en ^{238}Pu et plus faibles en $^{239+240}\text{Pu}$ – et en diminution par rapport aux valeurs mesurées en 2002.

Les rapports isotopiques $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ correspondants sont indiqués à la figure 19-b ; ils montrent que par rapport à la valeur de 0,03, caractéristique de celle des retombées des tirs, les sols étudiés présentent encore aujourd'hui un excès de ^{238}Pu relativement au $^{239+240}\text{Pu}$: ce rapport qui est en moyenne de 0,068 en 2009 a rapidement diminué puisqu'il était 2 fois plus élevé en 2002. L'empreinte des inondations passées qui ont amené des sédiments marqués par les rejets anciens de Marcoule reste donc encore détectable.

Les concentrations du césium 137 et du ^{90}Sr du riz prélevé en 2009 sont comparables à celles qui avaient été mesurées à Albaron (Camargue) dans les années 1994 - 1995 (Descamps et al., 1997) ; en ce qui concerne les émetteurs alpha, les activités massiques de l'américium 241 et du plutonium 238 sont inférieures à la limite de détection en 2009 alors que l'on les mesurait à de niveaux légèrement supérieurs en 1995, respectivement $1,3 \times 10^{-4}$ Bq/kg en ^{241}Am et $5,6 \times 10^{-4}$ Bq/kg en ^{238}Pu . En 2009, seul le $^{239+240}\text{Pu}$ est mesuré au-dessus de la limite de détection à une concentration de $6 \times 10^{-5} \pm 4 \times 10^{-5}$ Bq/kg frais, 3 fois plus faible que celles mesurées en 1993-1994 (Descamps et al., 1997). Les concentrations de ces radionucléides dans le riz ont donc tendance à diminuer plus rapidement que celles du sol, ce qui reflète la diminution de la biodisponibilité, généralement observée pour de nombreux radionucléides dont les actinides transuraniens.



a) Activités massiques



b) Rapports isotopiques du plutonium

Figure 19. Comparaison des sols de rizières en 2002 et 2009 et des sols de l'observatoire OPERA (sols prélevés en zones non influencées, dans le massif central et en Bretagne, prélèvements de 2002 à 2008).

4 Conclusion

Ce rapport d'étape présente l'avancement du constat « Vallée du Rhône » à la fin 2010, pour le milieu terrestre et les résultats acquis à cette date.

Les échantillons prélevés en 2009 aux environs immédiats du site de Marcoule ont confirmé les singularités, déjà étudiées par le passé, de cette zone, avec en particulier un marquage en tritium des végétaux dans l'axe de la vallée et une rémanence des contaminations anciennes en transuraniens et iode 129. Par ailleurs, les quelques points particuliers de Camargue, qui avaient fait l'objet d'études antérieures ont été revus, pour constater leur évolution.

Les résultats obtenus ne montrent aucune anomalie par rapport aux connaissances qui avaient été acquises précédemment.

Les prélèvements d'échantillons de denrées (70 échantillons environ) et de bio-indicateurs (tritium et carbone 14, sur les feuilles d'arbres) recherchés de l'amont de Creys-Malville jusqu'en Provence sont presque terminés en fin 2010 et leur mesures sont en cours ou achevées. Durant cette période, la stratégie d'étude relative au milieu aquatique a été affinée et les prélèvements et mesures ont débuté.

Un rapport d'avancement sera produit fin 2011-début 2012 pour faire le bilan de ces actions, avant qu'une synthèse soit faite dès que l'ensemble des données aura été rassemblé et examiné.

5 Références

- Claval D. (2010). *État radioécologique de référence du site de Pierrelatte dans le cadre du projet d'implantation d'un CNPE GDF-Suez*. Rapport IRSN/DEI/SESURE-2010-14.
- Descamps B., Carrere D., Laurent N. (1995). *Étude du marquage des feuilles de chêne de l'environnement du site de Marcoule par le tritium contenu dans les rejets atmosphériques, prélèvements d'octobre 1992*. Rapport IPSN/DPEI/SERE/95-021.
- Descamps B., Carrere D., Laurent N. (1997). *Étude radioécologique de l'environnement terrestre du site de Marcoule-Année 1995*. Rapport IPSN/DPEI/SERE/97-02.
- Duffa C. (2001). *Répartition du plutonium et de l'américium dans l'environnement terrestre de la basse vallée du Rhône*. Thèse Université Aix-Marseille III - Géosciences de l'environnement. Rapport CEA-R-5977.
- Duffa C. (2003). *Synthèse des études radioécologiques menées par l'IRSN depuis 1992 dans l'environnement de Marcoule*. Rapport IRSN/DEI/SESURE/03-03.
- Duffa C., Fréchou C. (2003). Evidence of long-lived I and Pu isotopes enrichment in vegetation samples around the Marcoule Nuclear Reprocessing Plant (France). *Applied Geochemistry*, 18, 1867-1873.
- Duffa C., Renaud P. (2004). *Projet CAROL Rapport final*. Rapport IRSN/DEI/SESURE/04-22.
- Eyrolle F. (2004). *Conséquences radiologiques des inondations de décembre 2003 en petite Camargue-Résultats de l'expertise réalisée à la demande de la CLI du Gard*. Rapport IRSN/DEI/SESURE/04-14.
- Eyrolle F., Duffa C., Leprieur F., Rolland B., Antonelli C., Marquet J., Salaun G., Renaud P. (2004). *Conséquences radiologiques des inondations de décembre 2003 en Petite Camargue au lieu dit 'Claire Farine'. Résultats de l'expertise réalisée. à la demande de la CLI du Gard*. Rapport IRSN/DEI/SESURE n° 2004-14.
- IAEA (2010). *Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments*. TRS 472 (révision du TRS 364).
- Pey B. (2008). *Spécificités culturelles du riz et modélisation radioécologique*. Rapport IRSN/DEI/SESURE-2008-05.
- Pourcelot L., Renaud P. (2006). *Activité des sédiments au large de la pointe de l'Espiguette*. Rapport IRSN/DEI/SESURE/06-24.
- Pourcelot L., Vassas C. (2005). *Mode de formation des placers radioactifs et origine des minéraux lourds du littoral de Camargue*. Rapport IRSN/DEI/SESURE/05-09.
- Renaud P. (2010). *Discussion sur la pertinence des analyses radiologiques environnementales pour la surveillance de routine effectuée par les exploitants nucléaires*. Rapport IRSN/DEI/SESURE-2010-08.

Renaud P., Gurriaran R. (2009). Réflexion sur l'évolution des concentrations en radionucléides artificiels dans l'environnement français, les doses associées et l'adaptation des techniques d'analyse aux besoins de la surveillance. *Radioprotection*, 44(2) : 169-186.

Roussel-Debet S. (2005). Experimental values for ^{241}Am and $^{239+240}\text{Pu}$ Kd's in French agricultural soils. *Journal of Environmental Radioactivity*, 79, 171-185.

Roussel-Debet S. (2007). Evaluation of ^{14}C doses since the end of the 1950's in metropolitan France. *Radioprotection*, 42(3), 297- 313.

Roussel-Debet S. (2008). *Comportement du tritium en milieu terrestre*. Rapport IRSN/DEI/SESURE/2008 - 33.

Roussel-Debet S., Antonelli C. (2010). *Constat radiologique régional - Objectifs et Méthode - Application à la Vallée du Rhône*. Rapport IRSN/DEI/SESURE 2010/01.

Roussel-Debet S., Beaugelin-Seiller K. (2002). Distribution coefficient Kd of transuranics in soils : experimental determination and consequences for dose assessment. *Radioprotection* -, 37, 297-302.

Roussel-Debet S., Gontier G., Siclet F., Fournier M. (2006). Distribution of Carbon 14 in the terrestrial environment close to French nuclear power plants. *Journal of Environmental Radioactivity*, 87, 246-259.

Vassas C., Pourcelot L., Vella C., Carpena J., Pupin J.-P., Bouisset P., Guillot L. (2006). Mechanisms of enrichment of natural radioactivity along the beaches of the Camargue, France. *Journal of Environmental Radioactivity*, 91, 146-159.

6 Annexes

6.1 Annexe 1. Données INAO par zone et par communes.

ZI/ZNI	ZONES	COMMUNES	Type	Produits
ZNI	AMONT CREYS	Lavours - Angletfort	Vin	Bugey blanc/rosé/rouge; mousseux; pétillant blanc/rosé
ZNI	AMONT CREYS	Lavours - Angletfort	Vin	Roussette du Bugey
ZNI	AMONT CREYS	Corbonod - Serrières en Chau - Jongieux - Seyssel - Bassy -	Vin	Roussette de Savoie
ZNI	AMONT CREYS	jongieux	Vin	Roussette de Savoie Marestel
ZNI	AMONT CREYS	Corbonod - Serrières en Chau - Jongieux - Seyssel - Bassy -	Vin	Vin de Savoie mousseux blanc/rosé; pétillant blanc/rosé
ZNI	AMONT CREYS	Corbonod - Serrières en Chau - Jongieux - Seyssel - Bassy -	Vin	Vin de Savoie ou Savoie rouge/rosé/blanc
ZNI	AMONT CREYS	Serrières-en-Chautagne	Vin	Vin de Savoie Chautagne blanc; rouge
ZNI	AMONT CREYS	Jongieux	Vin	Vin de Savoie Jongieux blanc; rouge
ZNI	AMONT CREYS	Seyssel - Corbonod	Vin	Seyssel
ZNI	AMONT CREYS	Seyssel - Corbonod	Vin	Seyssel mousseux
ZNI	AMONT CREYS	Corbonod - Serrières en Chau - Jongieux - Saint Génix sur Guiers - Chevrier - Seyssel - Bassy - Chene en semine	Fruits	Pommes et poires de Savoie
ZNI	AMONT CREYS	Bellegarde-sur-Valsérine	Fromage	Bleu de Gex haut Jura
ZNI	AMONT CREYS	Bellegarde-sur-Valsérine	Fromage	Morbier
ZNI	AMONT CREYS	Angletfort - Corbonod - Belegarde s Val..	Fromage	Comté
ZNI	AMONT CREYS	Angletfort - Corbond - Serrières en Ch - Jongieux - Saint Génix - Chevrier - Seyssel - Chene en Sem	Fromage	Emmental de Savoie
ZNI	AMONT CREYS	Angletfort - Corbonod - Belegarde s Val.. - Lavours - Serrières en Ch - Jongieux - St Génix sur Guiers - Chevrier - Seyssel - Bassy - Chene en Semine	Fromage	Emmental français Est-Central
ZNI	AMONT CREYS	Angletfort - Corbonod - Lavours - Bellegarde sur Val.. - Serrières en Chautagne - Jongieux - Saint Génix .. - Chevrier - Seyssel - Bassy - Chene en Semine	Fromage	Gruyère
ZNI	AMONT CREYS	Angletfort - Corbonod - Serrières en Chau - Jongieux - Saint Génix sur Guiers - Chevrier - Seyssel - Bassy - Chene en semine	Fromage	Tomme de Savoie
ZNI	AMONT CREYS	Angletfort - Corbonod - Bellegarde sur Val.. - Serrières en Chau - Jongieux - Saint Génix sur Guiers - Chevrier - Seyssel - Bassy - Chene en semine	Viande	Volailles de l'Ain
ZI	CREYS - BUGÉY	Creys mépieu - Hieres sur Amby	Fromage	Emmental français Est-Central
ZI	CREYS - BUGÉY	Creys mépieu - Hieres sur Amby	Viande	Volailles de l'Ain
ZNI	BUGÉY - St ALBAN	Vaulx en Velin - Rillieux la pape	Viande	Volailles de l'Ain
ZNI	BUGÉY - St ALBAN	Charly - Millery - Rilleux la Pape - Caluire et Cuire - Vaulx en Velin	Fromage	Emmental français Est-Central
ZNI	BUGÉY - St ALBAN	Charly - Irigny - Millery	Vin	Coteaux du Lyonnais blanc/ rouge / rosé; nouveau ou primeur
ZI	SAINT ALBAN	Saint Maurice l'exil	Fromage	Emmental français Est-Central
ZI	SAINT ALBAN	Saint Maurice l'exil	Viande	Volailles de la Drôme
ZNI	St ALBAN - ROMANS	Sarras - Ozon - Arras sur Rhône	Vin	Côtes du Rhône blanc/ rouge /rosé
ZNI	St ALBAN - ROMANS	Sarras - Ozon - Arras sur Rhône	Vin	Côtes du Rhône primeur ou nouveau rosé/ rouge
ZNI	St ALBAN - ROMANS	Sarras - Ozon - Arras sur Rhône	Vin	Saint-Joseph blanc / rouge
ZNI	St ALBAN - ROMANS	Sarras - Ozon - Arras sur Rhône	Viande	Fin Gras du Mézenc
ZNI	St ALBAN - ROMANS	Sarras - Ozon - Arras sur Rhône	Fromage	Picodon
ZNI	St ALBAN - ROMANS	Sarras - Ozon - Arras sur Rhône	Viande	Volailles de la Drôme
ZNI	ROMANS - CRUAS	Portes les Valence	Autre	Ail de la Drôme
ZNI	ROMANS - CRUAS	Beauchastel - Toulaud	Autre	Châtaigne d'Ardèche
ZNI	ROMANS - CRUAS	Beauchastel - Portes les Valences - Charmes sur Rh - Toulaud - Soyons	Viande	Fin Gras du Mézenc
ZNI	ROMANS - CRUAS	Beauchastel - Portes les Valences - Charmes sur Rh - Toulaud - Soyons	Fromage	Picodon

ZI/ZNI	ZONES	COMMUNES	Type	Produits
ZNI	ROMANS - CRUAS	Beauchastel - Portes les Valences - Charmes sur Rh - Toulaud - Soyons	Viande	Volailles de la Drôme
ZNI	ROMANS - CRUAS	Toulaud	Vin	Côtes du Rhône blanc/rouge /rosé
ZNI	ROMANS - CRUAS	Toulaud	Vin	Côtes du Rhône primeur ou nouveau rosé/ rouge
ZNI	ROMANS - CRUAS	Toulaud	Vin	Saint-Péray; Saint Péray mousseux
ZI	CRUAS	Cruas	Fromage	Picodon
ZI	CRUAS	Cruas	Viande	Volailles de la Drôme
ZNI	CRU - TRI	Châteauneuf Du Rhône	Vin	Coteaux du Tricastin blanc, rouge, rosé , primeur ou nouveau
ZNI	CRU - TRI	Châteauneuf Du Rhône	Miel	Miel de Provence
ZNI	CRU - TRI	Châteauneuf Du Rhône	Fromage	Picodon
ZNI	CRU - TRI	Châteauneuf Du Rhône	Viande	Volailles de la Drôme
ZI	TRICASTIN	Pierrelatte	Fromage	Picodon
ZI	TRICASTIN	Pierrelatte	Viande	Volailles de la Drôme
ZI	TRICASTIN	Pierrelatte	Autre	Ail de la Drôme
ZI	TRICASTIN	Pierrelatte	Miel	Miel de Provence
ZI	MARCOULE	Codolet	Vin	Côtes du Rhône blanc/ rouge/rosé
ZI	MARCOULE	Codolet	Vin	Côtes du Rhône primeur ou nouveau rosé/rouge
ZI	MARCOULE	Codolet	Vin	Côtes du Rhône Villages blanc/ rosé / rouge
ZI	MARCOULE	Codolet	Vin	Côtes du Rhône Villages Chusclan rosé / rouge
ZI	MARCOULE	Codolet	Miel	Miel de Provence
ZI	MARCOULE	Codolet	Viande	Volailles du Languedoc
ZNI	AVAL MARCOULE	Chateaurenard - Boulbon - Tarascon - Arles	Viande	Agneau de Sisteron
ZNI	AVAL MARCOULE	Arles - Beaucaire - Bellegarde - Tarascon - Saint Gilles - Vauvert - Monfrin - Boulbon - Chateaurenard	Viande	Taureau de Camargue
ZNI	AVAL MARCOULE	Arles - Beaucaire - Bellegarde - Chateaurenard - Boulbon - Monfrin - Tarascon - Saint Gilles - Vauvert -	Viande	Volailles du Languedoc
ZNI	AVAL MARCOULE	Monfrin	Vin	Côtes du Rhône blanc / rosé / rouge
ZNI	AVAL MARCOULE	Monfrin	Vin	Côtes du Rhône primeur ou nouveau rosé / rouge
ZNI	AVAL MARCOULE	Monfrin	Vin	Côtes du Rhône Villages blanc / rosé / rouge
ZNI	AVAL MARCOULE	Bellegarde	Vin	Clairette de Bellegarde
ZNI	AVAL MARCOULE	Beaucaire - Bellegarde - Saint Gilles - Vauvert	Vin	Costières de Nîmes blanc / rosé /rouge
ZNI	AVAL MARCOULE	Chateaurenard - Boulbon - Tarascon - Arles	Autre	Huile d'olive de Provence
ZNI	AVAL MARCOULE	Monfrin - Beaucaire - Bellegarde - Saint Gilles - Vauvert	Autre	Huile d'olive de Nîmes
ZNI	AVAL MARCOULE	Beau caire - Monfrin - Bellegarde - Saint Gilles - Vauvert	Autre	Olive de Nîmes
ZNI	AVAL MARCOULE	Tarascon - Arles	Autre	Huile d'olive de la vallée des Baux-de-Provence
ZNI	AVAL MARCOULE	Tarascon - Arles	Autre	Olives cassées de la vallée des Baux-de-Provence
ZNI	AVAL MARCOULE	Tarascon - Arles	Autre	Olives noires de la vallée des Baux-de-Provence
ZNI	AVAL MARCOULE	Chateaurenard - Boulbon - Tarascon - Arles - Monfrin - Beaucaire - Bellegarde - Saint Gilles - Vauvert	Miel	Miel de Provence
ZNI	AVAL MARCOULE	Arles	Autre	Foin de Crau
ZNI	AVAL MARCOULE	Arles - Beaucaire - Bellegarde - Tarascon - Saint Gilles - Vauvert	Autre	Riz de Camargue

6.2 Annexe 2. Synthèse des données AGRESTE 2000 par zone et par communes sur l'ensemble des communes étudiées

ÉLEVAGE (effectif)																		
ZONES		Nombre COMMUNES	bovins	tot vaches	vaches lait	vaches nour.	volailles	poules pond	poulets chair et coq	Dindes (ons)	ovins	brebis mères	Agnelles	caprins	chèvres	Lapines	porcins	Ruche
ZNI	AMONT CREYS	12	4369	1993	1622	273	8664	8332	89			30						
ZI 5km	CREYS	5	909	320	224		20945		108			24					6	
ZI 5km	BUGEY	8	727	350	90	115	5829		150						68			
ZNI	BUG - ALB	14	139	76			1515		44		20	18			68			
ZI 5km	St ALBAN	13	466	261	168		462	33	4			78			134			
ZNI	ALB - ROM	9	1737	813	435		23719	983	735	13		223			400	441		
ZNI	ROM - CRU	11	653	393	231		373057	9895	139533	25032		999	42		1149	84	2832	
ZI 5Km	CRUAS	9	575	198			325201	313042	9025	22		2527	141		19	26	307	
ZNI	CRU - TRI	1	33				33057	170	13880			197						
ZI 5km	TRICASTIN	4					20806	20172	67									918
ZI 5Km	MAR AVAL MARCOULE	5					14759							87				23
ZNI	MARCOULE	10	8810	2992	32	301	53950				53428	30674		218			6	
FRUITS ET LÉGUMES (Superficie en ha)																		
ZONES		Nombre COMMUNES	Pl. Arom.	Lég. frais	Melons	Tomates	Salades	Courgettes	vignes	vignes d'app.	vergers	Cerisier	Pêchers	Poiriers	Pomm.	Abricot.	Oliviers	Riz
ZNI	AMONT CREYS	12		5					367	241								
ZI 5km	CREYS	5							35									
ZI 5km	BUGEY	8							1									
ZNI	BUG - ALB	14		675					63		318	31	74	69	117			
ZI 5km	St ALBAN	13		17					46		583	3		4	4			
ZNI	ALB - ROM	9		34					201		391					163		
ZNI	ROM - CRU	11		326					181		786		231			137		
ZI 5Km	CRUAS	9		62					99		198		135			4		
ZNI	CRU - TRI	1	29	88					39		217		163			40		
ZI 5km	TRICASTIN	4	17	183	15	50			857		41			18		12		
ZI 5Km	MAR AVAL MARCOULE	5		300	126	51			3217	2176	153			12	41			
ZNI	MARCOULE	10		2287	180	288	658	66	8269	2597	5849		1544				278	10844

6.3 Annexe 3. Sites internet consultés pour constituer la liste des contacts préalables aux missions de terrain

Pages jaunes : <http://www.pagesjaunes.fr/trouverlesprofessionnels/index.do>

Annuaire professionnel : <http://www.pageswebpro-agriculture.com/>

Sites dédiés à l'agriculture biologique, écologique :

<http://www.corabio.org/>

<http://bio-provence.org/>

<http://www.agence-bio.org/>

<http://www.agriculturebio.org/>

<http://alimentation.bioetbienetre.fr/producteurs/viande/rhone-alpes/c5/r22.html>

<http://www.fnab.org/>

<http://www.ecolopop.info/annuaire-des-boutiques?type=2>

Sites Paysans

<http://www.bienvenue-a-la-ferme.com/>

<http://www.accueil-paysan.com/index.htm>

<http://www.fermagora.com/post/La-ferme-de-Blacieux>

http://www.aoc-fin-gras-du-mezenc.com/Accueil_16.0.html

<http://www.aildromois.com/consommation-production.php>

<http://www.picodon-aoc.fr/>

Chambres d'agriculture:

PACA : <http://paris.apca.chambagri.fr/apca/data/adresse/tr1019.htm>

Rhône Alpes: <http://paris.apca.chambagri.fr/apca/data/adresse/tr1020.htm>

Ain : <http://ddaf.ain.pref.gouv.fr/dgeaf/textes/partenaires/ca.html>

6.4 Annexe 4. Calendrier des périodes de prélèvement

	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Vin			x						
Raisin						x	x	x	
Lait de vache			x			x			
Courgettes...			x			x			
Salades...			x			x			
Poires						x			
Pommes						x			
Abricots			x						
Pêches			x			x			
Fromages de chèvre			x			x			
Châtaignes						x			
Plantes aromatiques			x						
Viandes			x			x			

Période optimale x Période possible

6.5 Annexe 5. État d'avancement (décembre 2010) du plan de prélèvements et de mesures de denrées

Zones	Échantillons	Prélèvement	Mesure par spectrométrie gamma	Mesure du ⁹⁰ Sr
Amont CRM	Vin	Prévu	Prévu	
	Raisin	Terminé	En cours	
	Pommes	Terminé	En cours	
	Lait de vache	Terminé	En cours	En cours
	Viande	Terminé	En cours	
CRM	Lait de vache ¹⁶	Terminé	Terminé	Terminé
	Salade*	Terminé		
	Raisin	Terminé	En cours	
	Vin	Terminé	Prévu	
	Viande	Terminé	En cours	
BUG	Poires, pommes ou prunes	Prévu	Prévu	
	Viande	Terminé	En cours	
	Maïs*	Terminé	En cours	
	Raisin*	Terminé	En cours	
	Vin*	Terminé	Prévu	
BUG-ALB	Salade	Terminé	Terminé	
	Cerises	Terminé	Terminé	
	Tomates	Terminé	En cours	
	Viande	Terminé	En cours	
	Lait de vache	Terminé	En cours	En cours
ALB	Lait de vache*	Terminé	Terminé	Terminé
	Salade*	Terminé	Terminé	
	Viande	Prévu	Prévu	
ALB - ROM	Vin	Terminé	Terminé	
	Fromage chèvre	Terminé	Terminé	En cours
	Miel	Terminé	Terminé	
	Abricots	Terminé	Terminé	
ROM-CRU	Abricots	Terminé	Terminé	
	Pêches	Terminé	Terminé	
	Pommes	Terminé	Terminé	
	Châtaignes	Prévu	Prévu	
	Vin	Terminé	Terminé	
	Fromage chèvre	Terminé	Terminé	Terminé
	Tomates	Terminé	En cours	
	Viande	Prévu	Prévu	
Noix	Terminé	Terminé		
CRU	Aubergines	Terminé	En cours	
	Pêches, brugnons	Prévu	Prévu	
	Lait de chèvre*	Terminé	Terminé	En cours
	Œufs	Terminé	En cours	
	Salade*	Terminé	Terminé	
	Viande	Prévu	Prévu	
	Ail	Terminé	En cours	

¹⁶Le symbole * signale que l'échantillon est prélevé dans le cadre d'une autre étude.

Zones	Échantillons	Prélèvement	Mesure par spectrométrie gamma	Mesure du ⁹⁰ Sr
CRU-TRI	Lait de chèvre	Terminé	En cours	En cours
	Viande	Prévu	Prévu	
	Aromatiques (thym)	Terminé	En cours	
	Pêches	Terminé	Terminé	
	Courgettes	Terminé	Terminé	
TRI	Courgettes*	Terminé	En cours	Terminé
	Salade*	Terminé	En cours	
	Romarin*	Terminé	En cours	
	Blé*	Terminé	En cours	
	Fromage chèvre	Terminé	Terminé	
	Thym	Terminé	Terminé	
	Œuf	Terminé	En cours	
	Viande - Poulet	Terminé	En cours	
Miel	Terminé	En cours		
MAR	Miel	Terminé	En cours	En cours
	Salade	Terminé	Terminé	
	Raisin	Terminé	Terminé	
	Sanglier	Terminé	Terminé	
Aval MAR	Huile d'olive	Terminé	Terminé	Prévu
	Viande	Prévu	Prévu	
	Viande	Prévu	Prévu	
	Aromatiques (thym)	Terminé	Terminé	
	Fromage chèvre	Prévu	Prévu	
	Abricots	Terminé	En cours	
	Salade	Terminé	En cours	
	Riz ¹⁷	Terminé	Terminé	
	Pêches/brugnons	Prévu	Prévu	
Poivrons	Terminé	En cours		

¹⁷ cf. § 2.5 : prélèvements spécifiques.

6.6 Annexe 6. Données météorologiques relatives au site de Marcoule (station : Chusclan)

