

Interprétation des résultats des mesures de carbone 14 réalisées sur des échantillons végétaux prélevés dans l'environnement de l'usine SOCATRI en juillet et août 2008

DEI/SESURE/2008-52

**DIRECTION DE L'ENVIRONNEMENT ET DE
L'INTERVENTION**

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



Demandeur	ASN-Dép-Lyon-1100-2008				
N° action/Processus de rattachement	N° affaire 15000153/0010/ Processus R1				
<p>Interprétation des résultats des mesures de carbone 14 réalisées sur des échantillons végétaux prélevés dans l'environnement de l'usine SOCATRI en juillet et août 2008</p> <p>S. Roussel-Debet</p> <p>Laboratoire d'études radioécologiques en milieux continental et marin</p> <p>DEI/SESURE/2008-52</p>					
	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	17/11/08	17/11/08	13/11/08	24/11/08	
Signatures					

DIFFUSION : Libre Interne Limitée

LISTE DES PARTICIPANTS

Philippe Renaud, Vanessa Parache, Lionel Saey	Stratégie de prélèvements Prélèvements et prétraitements d'échantillons ; cartographie de l'échantillonnage	SESURE/LERCM
O. Pierrard	Rejets des installations	SESURE/LVRE
C. Cossonnet, R. Gurriaran	Métrieologie du ¹⁴ C	STEME/LMRE

RESUME

Un rejet de carbone 14 à l'atmosphère, émis par l'usine SOCATRI entre le 25 juin et le 2 juillet 2008, a conduit au dépassement de la limite annuelle autorisée pour cette installation. Dans le cadre d'une saisine de l'ASN et conformément à la réponse faite par l'IRSN le 8 août 2008 (lettre IRSN/DIR/2008-456), l'IRSN a prélevé des végétaux en juillet et août 2008 dans l'environnement proche du site et a mesuré l'activité du carbone 14 de ces échantillons, afin de déceler un marquage éventuel lié à ce rejet. Les résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes. L'activité spécifique moyenne du ^{14}C dans les végétaux terrestres de la zone du Tricastin, hors influence des vents dominants passant sur le site nucléaire, est en 2008 de 240 Bq de ^{14}C par kg de carbone (Bq $^{14}\text{C}/\text{kg C}$), égale au bruit de fond des autres régions françaises. Par rapport à ce bruit de fond, une augmentation faible, mais significative, des valeurs moyennes des mesures d'échantillons issus de la zone potentiellement influencée est constatée : 256 à 259 Bq $^{14}\text{C}/\text{kg C}$, soit une augmentation d'environ 7,5 % (+18 Bq $^{14}\text{C}/\text{kg C}$) par rapport au bruit de fond. Le rejet de SOCATRI a participé à cette légère augmentation, pour une part estimée au maximum à + 10 Bq $^{14}\text{C}/\text{kg C}$ (4,5 %), le reste du marquage provenant des rejets autorisés de carbone 14 de la centrale nucléaire EDF du Tricastin. L'augmentation de la dose efficace par ingestion, pour un individu qui aurait consommé durant 3 mois des denrées uniquement issues de la zone influencée, serait de moins de 0,2 μSv , valeur cohérente avec celle calculée antérieurement par l'IRSN à partir de la quantité de carbone 14 rejeté par SOCATRI, estimée au maximum à 0,5 μSv (Lettre IRSN/DIR/2008-456 du 8 août 2008).

Sommaire

1 Introduction	7
2 Résultats obtenus	7
3 Éléments disponibles pour l'établissement du « bruit de fond » du carbone 14	9
4 Examen des résultats de 2008	10
4.1 Énoncé des biais et limites dans l'interprétation des résultats.....	10
4.1.1 Comportement du carbone dans les végétaux et dans l'environnement	10
4.1.2 Date du rejet de ^{14}C par rapport au stade de développement des végétaux.....	12
4.1.3 Incertitude relative à la zone potentiellement influencée	14
4.2 Examen des résultats 2008 et comparaison avec les autres données disponibles	14
4.2.1 Observations générales	14
4.2.2 Tests statistiques	19
4.2.3 Évaluation dosimétrique	20
5 Conclusion	21
6 Annexes	22
6.1 Unités et signification des divers modes d'expression des résultats.	22
6.2 Conditionnement des échantillons et mesures.	23
6.3 Résultats des mesures de ^{14}C acquises dans le cadre d'OPERA terrestre en 2007-2008.....	24
6.4 Courbe générale d'évolution du ^{14}C dans la biosphère terrestre.	25
6.5 Données issues de l'étude décennale du CNPE du Tricastin	26
6.5.1 Résultats des mesures de ^{14}C obtenues à l'occasion de l'étude décennale de Tricastin.	26
6.5.2 Localisation des prélèvements effectués dans le cadre du bilan décennal du site du Tricastin.....	27
6.5.3 Fréquences et vitesses de vent	28
6.6 Estimation des activités spécifiques théoriques des végétaux.....	29
6.7 Description de l'analyse statistique.....	31
7 Références	35

Tableaux

<i>Tableau 1 : Résultats des mesures de ¹⁴C acquises en juillet et août 2008.</i>	16
--	----

Figures

<i>Figure 1 : Prélèvements effectués en juillet et août 2008 et activité spécifique mesurée dans les végétaux, exprimée en Bq de ¹⁴C par kg de carbone (Bq ¹⁴C/kg C).</i>	8
<i>Figure 2 : Statistiques descriptives - comparaison des résultats acquis en 2001 (Tricastin 2001) entre zone potentiellement influencée ou non (ZI et ZNI).</i>	10
<i>Figure 3 : Illustration d'une courbe de croissance des végétaux couplée à la représentation de la variation de l'activité de l'air.</i>	13
<i>Figure 4 : Comparaison des activités spécifiques théoriques de l'air durant le rejet aux résultats de mesure des échantillons situés dans le secteur potentiellement exposé.</i>	17
<i>Figure 5 : Statistiques descriptives - comparaison du bruit de fond et des mesures Tricastin 2008.</i>	18

1 Introduction

L'installation d'assainissement et de récupération de l'uranium (INB n°138) de l'usine SOCATRI a rejeté dans l'atmosphère 2,26 GBq de carbone 14 entre le 25 juin et le 2 juillet 2008, entraînant un dépassement de 5% de la limite annuelle autorisée pour cette installation, compte tenu des rejets déjà réalisés depuis début 2008. Des rejets, beaucoup plus faibles (de l'ordre de 0,1 GBq/semaine) se sont poursuivis au cours du mois de juillet. À la suite de ce constat de dépassement d'une limite réglementaire, l'ASN a saisi l'IRSN le 6 août 2008 (lettre ASN Dép-Lyon - n°1100-2008) en lui demandant d'évaluer les conséquences de ce rejet sur les populations et l'environnement et d'élaborer un programme de mesures dans l'environnement visant à déceler un impact éventuel de ce rejet. L'IRSN a répondu le 8 août 2008 (lettre IRSN/DG/2008-456) en fournissant une estimation de la dose maximale susceptible d'être reçue par une personne exposée aux conséquences de ce rejet et en proposant un programme de mesures sur des échantillons de végétaux, compte tenu du fait que la contribution majoritaire à la dose vient de la consommation de denrées végétales produites dans la zone affectée par le rejet de carbone 14.

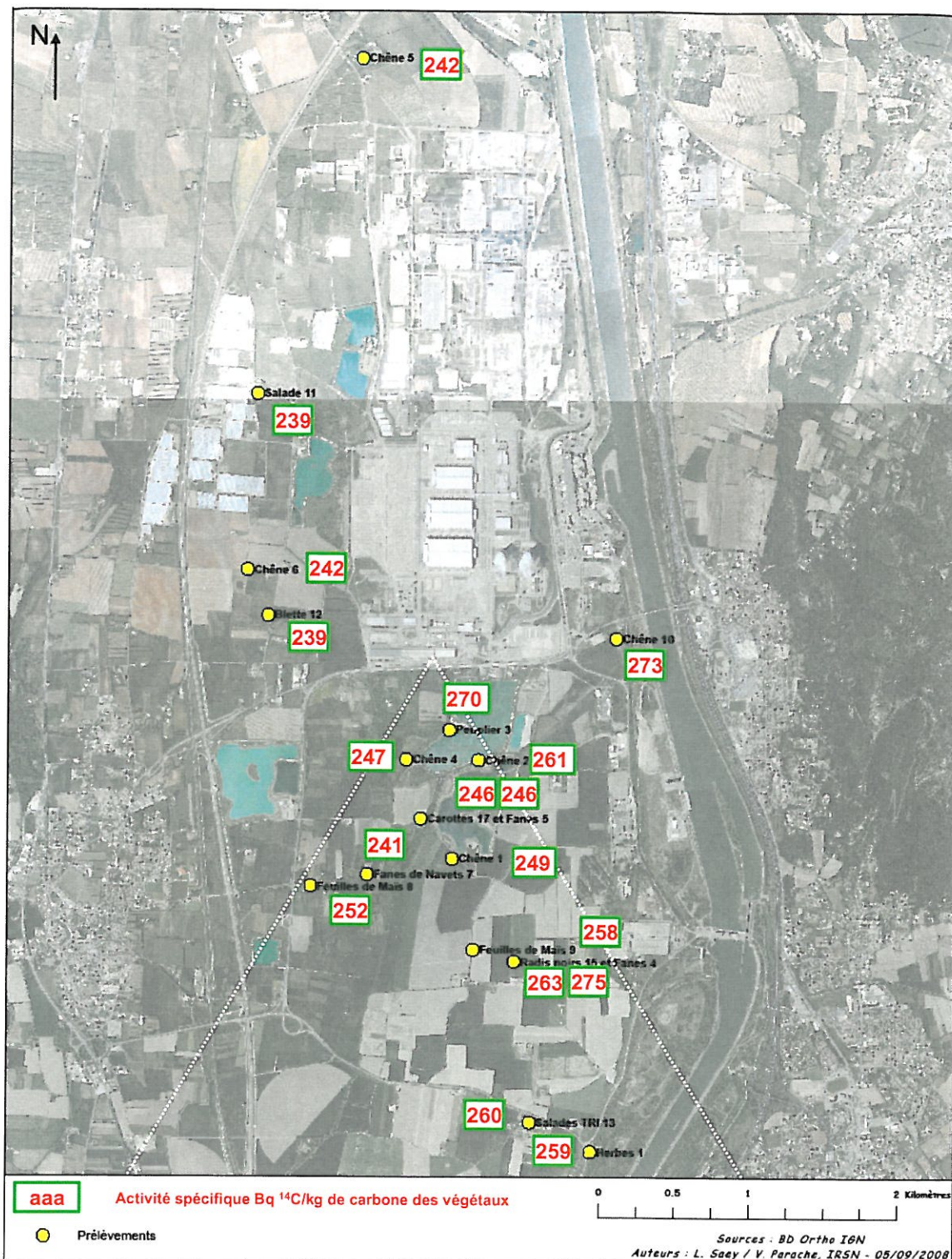
Pour la réalisation du programme de mesure, des échantillons qui avaient été prélevés par l'IRSN en juillet 2008 (suite à l'incident du 7 juillet 2008 relatif au déversement accidentel dans l'environnement d'une solution contenant de l'uranium à partir de l'installation SOCATRI) ont pu être utilisés pour l'analyse du ^{14}C . Une autre série de prélèvements a été réalisée en août 2008. Pour cette deuxième série de prélèvements, il a été tenu compte de l'étude d'impact réalisée par l'IRSN le 8 août 2008 (lettre IRSN/DG/2008-456) permettant de situer la zone probablement la plus affectée par le rejet, au sud du site (azimuts 160° à 200°), en raison des conditions météorologiques qui prévalaient dans la période du rejet de carbone 14.

2 Résultats obtenus

La carte de la figure 1 présente les différents échantillons prélevés et les résultats de mesure obtenus. Le détail des valeurs est fourni au paragraphe 4.2. A partir de ces résultats, deux questions sont étudiées :

- les activités du ^{14}C dans les échantillons prélevés en juillet et août 2008, *conventionnellement dénommés dans la suite du texte « Tricastin-2008 »*, sont-elles significativement supérieures au bruit de fond moyen en France ?
- dans l'affirmative, l'augmentation des activités du ^{14}C des échantillons Tricastin-2008 situés dans la zone potentiellement influencée par le rejet de juin-juillet 2008 émis par SOCATRI est-elle imputable à cet événement particulier ?

Pour présenter de façon synthétique les résultats et l'examen qui en est fait, de nombreux détails et précisions (signification des unités, données antérieures, analyses...) sont reportés dans les annexes.



La description des unités et de leur signification est reportée en annexe 6.1. La méthode de mesure est résumée en annexe 6.2. Le trait blanc pointillé représente la limite de la zone théoriquement la plus affectée par le rejet. En ce qui concerne les arbres (peuplier, chênes), il s'agit des feuilles.

Figure 1 : Prélèvements effectués en juillet et août 2008 et activité spécifique mesurée dans les végétaux, exprimée en Bq de ¹⁴C par kg de carbone (Bq ¹⁴C/kg C).

3 Éléments disponibles pour l'établissement du « bruit de fond » du carbone 14

Dix analyses de l'activité spécifique¹ du carbone 14 ont été réalisées sur diverses matrices prélevées en 2007-2008, dans le cadre du réseau OPERA exploité par l'IRSN, sur des zones éloignées de toute influence d'installation susceptible de rejeter du ¹⁴C (cf. annexe 6.3). On constate que l'activité spécifique du ¹⁴C se situe actuellement au voisinage de 240 Bq/kg C.

Par ailleurs, les données bibliographiques sur l'évolution du bruit de fond en ¹⁴C en France ont fait l'objet de synthèses (Roussel-Debet et al., 2006 ; 2007) qui sont illustrées par une courbe d'évolution de l'activité spécifique du ¹⁴C en milieu terrestre, sous nos latitudes (cf. annexe 6.4). Les données du réseau OPERA précitées se placent correctement dans le prolongement de cette courbe. On notera que la période de décroissance apparente (exponentielle) de l'activité spécifique est de l'ordre de 98 ans. Ainsi, en 2001, il est possible d'estimer que le bruit de fond moyen était de l'ordre de $240 \times 1,05$, soit 252 Bq/kg C, le facteur 1,05 représentant la correction liée à cette décroissance entre 2001 et 2008.

Nous disposons également des résultats acquis lors du bilan décennal du CNPE du Tricastin en 2001 (Gontier et al., 2006). Le détail de ces données et leur localisation se trouvent en annexe 6.5. Une description statistique globale de ces données est reportée figure 2.

En fonction de la rose des vents moyenne annuelle sur le site, les prélèvements de 2001 ont été affectés d'un indice ZI « zone potentiellement influencée » ou ZNI « zone potentiellement non influencée » : il s'agit des zones respectivement situées sous les vents de directions les plus probables en moyenne annuelle, en l'occurrence au Sud-Sud-Ouest du site (et secondairement au Nord). En fonction de la rose des vents moyenne annuelle (annexe 6.5), il convient de souligner les limites de ce classement : aux vents dominants du Nord-Nord-Est sont associées des conditions de dispersion dites « normales » (temps sec et vitesse élevée), susceptibles de diluer plus intensément les polluants atmosphériques que les conditions de vents faibles ou nuls ; celles-ci se produisent notamment par temps de pluie et aboutissent à une concentration plus forte des polluants avec une dispersion relativement homogène sur l'ensemble des secteurs. Par ailleurs, les conditions de rejet durant l'année peuvent ne pas être constantes et donc se produire durant des périodes différentes de celles pendant lesquelles soufflent les vents dominants. De plus, si les rejets aboutissent à une augmentation de l'activité de l'air uniquement durant la nuit, ils ne conduiront pas à l'incorporation de ¹⁴C dans les végétaux, la phase d'incorporation photosynthétique du CO₂ se produisant uniquement durant la journée. Enfin, l'intensité de l'influence du rejet diminue évidemment avec la distance. Ainsi, en particulier pour des conditions moyennes annuelles, est-il délicat de déterminer avec certitude quels prélèvements sont ou ne sont pas en zone influencée.

¹ Expression usuelle des résultats d'analyse du carbone 14, en becquerels de carbone 14 par kilogramme de carbone stable, ¹²C + ¹³C, (Bq ¹⁴C/kg de carbone), habituellement abrégée en Bq/kg C, cf. annexe 6.1.

Les données acquises en 2001, ainsi classées en ZI et ZNI peuvent être comparées au bruit de fond théorique en 2001, que nous avons estimé précédemment à 252 Bq/kg C.

On observe (figure 2) que la valeur moyenne de 250 Bq/kg C relative à la zone potentiellement non influencée, ZNI, est très proche du bruit de fond théorique en 2001. Sur la zone potentiellement influencée, ZI, la moyenne est de 258 Bq/kg C. Comme indiqué dans l'étude décennale, ceci reflète un impact local faible mais perceptible de rejets de ^{14}C sur la zone influencée ; la différence entre ZI et ZNI serait, en moyenne, de l'ordre de + 3 % (+ 6 Bq/kg C) pour l'année 2001.

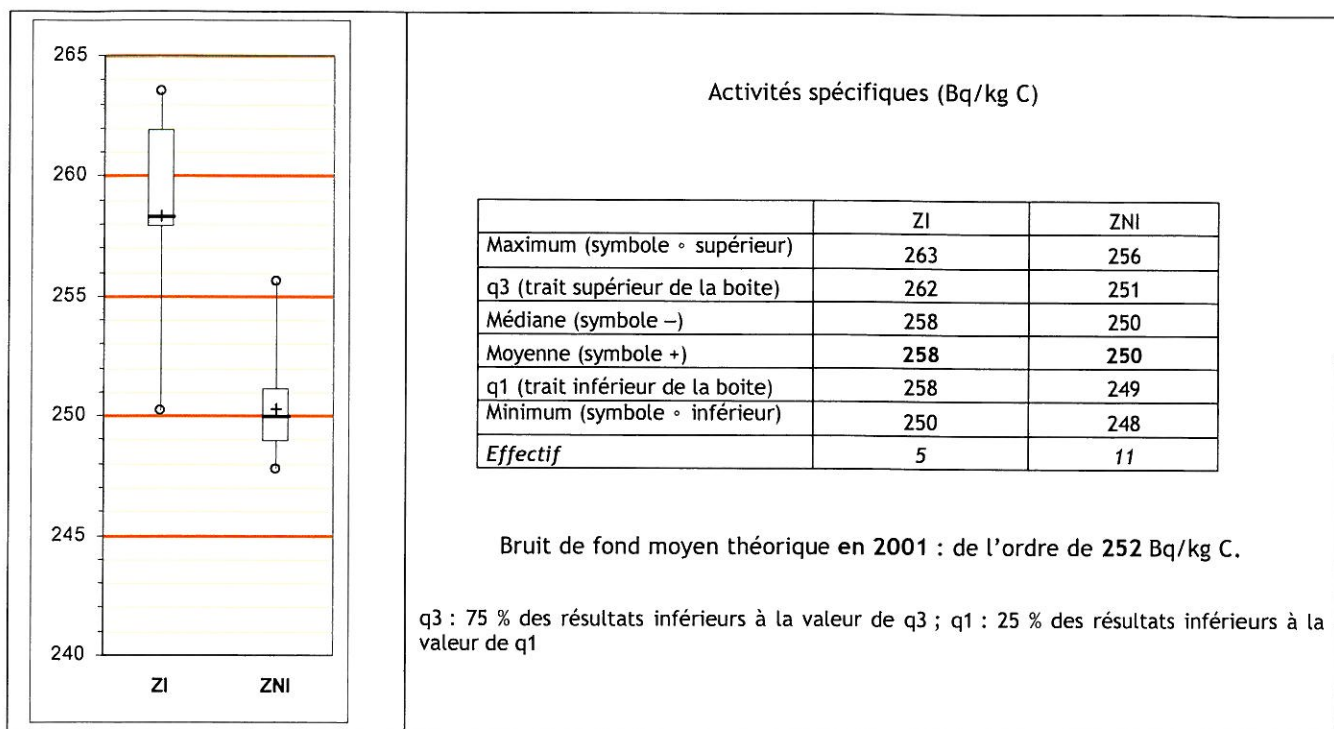


Figure 2 : Statistiques descriptives - comparaison des résultats acquis en 2001 (Tricastin 2001) entre zone potentiellement influencée ou non (ZI et ZNI).

4 Examen des résultats de 2008

4.1 Énoncé des biais et limites dans l'interprétation des résultats.

L'examen des résultats des mesures acquis en 2008 nécessite le rappel de certaines spécificités qui peuvent induire des biais ou des limites dans l'interprétation de ces résultats.

4.1.1 Comportement du carbone dans les végétaux et dans l'environnement

Les feuilles d'arbres ou d'arbustes à feuillage caduc ainsi que les organes aériens et les tubercules des végétaux annuels prélevés ont incorporé le ^{14}C atmosphérique durant leur croissance de l'année, entre la période de la

reprise de végétation et le moment du prélèvement (cf. § 4.1.2). Ces échantillons végétaux ne contiennent pas de carbone 14 présent dans l'environnement avant le début de leur croissance (absence de rémanence, contrairement, par exemple, aux bois des arbres dont les cernes peuvent précisément servir à la datation ou au suivi de rejets importants et prolongés durant plusieurs années).

Dans le cas des végétaux persistants, il n'y a pas non plus de transfert à partir d'un organe préexistant (tiges ligneuses, bois, système racinaire) ayant été marqué par du carbone 14 au cours des années précédentes, vers un nouvel organe ayant poussé au cours de l'année 2008 : la matière organique, une fois constituée l'année n ne va pas subir de redistribution l'année $n+1$.

Bien évidemment, les organes de réserve (par exemple racines de radis et de carottes) vont stocker des glucides formés dans les feuilles. Le ^{14}C incorporé via la biomasse foliaire va se retrouver, en fin de croissance, avec la même activité spécifique moyenne dans les feuilles et dans les organes de réserve. C'est le cas des échantillons de carottes (carottes-racine-17 et fanes de carotte-5 : 246 Bq/kg C dans les deux échantillons). Si le prélèvement d'échantillon a lieu durant la phase de constitution des réserves, on peut émettre l'hypothèse qu'il existe une faible différence entre les feuilles, alors légèrement plus marquées que les organes de réserve (glucides en cours d'accumulation). Cette hypothèse n'explique néanmoins probablement pas totalement la différence importante observée dans les radis noirs entre la racine et le feuillage (radis-racines-15 : 263 ± 18 Bq/kg et fanes-de-radis-4 : 275 ± 18 Bq/kg C). La différence entre ces valeurs (12 Bq/kg C) est inférieure aux incertitudes de mesure (18 Bq/kg C dans les deux cas avec un degré de confiance de 95 %), ce qui peut contribuer à cet écart.

En ce qui concerne l'éventualité d'une rémanence, le seul biais possible, mais non quantifiable, est lié à la matière organique du sol. Le ^{14}C émis avec le carbone stable, sous forme de CO_2 à partir, d'une part, de la minéralisation de la matière organique des sols et, d'autre part, de la respiration racinaire, peut modifier l'activité spécifique du CO_2 de la couche d'air qui se trouve au niveau du couvert végétal. La fraction émise qui provient de la minéralisation peut être enrichie ou appauvrie en ^{14}C , selon notamment les apports des années précédentes. On considère que cette émanation, qui est à son maximum en été, participerait jusqu'à une valeur maximale de 15 % au carbone total incorporé par photosynthèse, dans le cas de cultures à forte densité de biomasse aérienne, telles que les céréales (Roussel-Debet, 2001). Selon que la matière organique du sol est elle-même enrichie ou appauvrie en ^{14}C par rapport à l'air et selon l'intensité de la respiration des racines, cette émanation pourrait augmenter ou diminuer l'activité spécifique du CO_2 utilisé globalement par la plante. Sans une connaissance quasi « expérimentale » de tout l'écosystème et de son historique, il n'est absolument pas possible de tenir compte de ce biais éventuel. Néanmoins, en sols agricoles, faiblement pourvus en matière organique (2 à 4 %), cette éventuelle contribution d'apports antérieurs est probablement minime. Pour les feuilles d'arbres, cette contribution est négligeable, en raison de la hauteur de la canopée (quelques mètres) par rapport à la hauteur de l'air susceptible d'être affectée par l'émanation (quelques dizaines de centimètres).

Par ailleurs, l'activité spécifique est par définition l'activité du ^{14}C rapportée au carbone stable. Ce rapport peut varier selon la teneur en CO_2 de l'air qui dépend de la saison et du cycle jour/nuit (plus de CO_2 en hiver ainsi que la nuit en l'absence de photosynthèse) et qui est aussi influencé par l'intensité des émissions anthropiques (provenant notamment des combustibles fossiles fuel, essence, gaz naturel... qui sont complètement dépourvus de ^{14}C par décroissance radioactive). Cet autre biais éventuel n'est pas quantifié mais sur une zone géographique

restreinte, comme celle étudiée, il est vraisemblable que le CO₂ ajouté par les émissions anthropiques est à peu près homogène et que ce paramètre n'ait qu'une faible incidence sur les résultats.

4.1.2 Date du rejet de ¹⁴C par rapport au stade de développement des végétaux

La plupart des échantillons de végétaux prélevés en juillet et août 2008 était en phase de croissance et plus probablement en fin de croissance au moment du rejet de juin-juillet. Ils ont incorporé, sous forme de CO₂, le ¹⁴C présent dans l'air durant toute leur période de végétation, donc en partie avant le rejet et en partie après (jusqu'à la date de prélèvement). Il est impossible de préciser davantage à quels stades végétatifs se trouvaient, au moment du rejet, les végétaux échantillonnés. Or les conséquences d'un rejet de durée limitée sur la proportion de carbone (donc de ¹⁴C) incorporée dépendent directement du stade de développement de la plante concomitant à ce rejet. La figure 3 illustre, à titre d'exemple, cet effet (les calculs afférents sont décrits en annexe 6.6), en représentant :

- d'une part une courbe typique ² de croissance de la matière végétale. Il s'agit en réalité de l'indice de surface foliaire LAI (m²/m²) des légumes-feuille, pris ici comme exemple, en pourcent du LAI atteint à maturité. On fait l'hypothèse, habituellement admise bien qu'approximative, que la quantité de matière sèche — donc de matière organique et de carbone — est proportionnelle au LAI (*courbe figurée en vert, échelle de droite*) ;
- d'autre part, les activités spécifiques :
 - du CO₂ de l'atmosphère, qui présente une augmentation brutale pendant les 8 jours du rejet considéré (*courbe figurée en bleu, échelle de gauche*). Cette courbe correspond à une évaluation à 1 km sous les vents dominants ;
 - du végétal concerné, selon son état de croissance durant le rejet, soit qu'il se trouvait en fin de croissance ❶, soit qu'il se trouvait en pleine croissance ❷ (*courbe figurée en rouge, échelle de gauche*).

En théorie, pour un légume-feuille, en fin de croissance ❶, le végétal a formé environ 80 % de sa biomasse en présence d'une activité spécifique de l'air égale au bruit de fond (240 Bq/kg C). Les 20 % supplémentaires de biomasse sont formés en présence d'une activité spécifique de l'air de 450 Bq/kg C. L'activité spécifique moyenne de l'échantillon récolté à maturité est alors de 259 Bq/kg C.

Pour un légume-feuille, en pleine croissance ❷, 30 % de la biomasse aérienne sont formés en présence d'une activité de l'air égale au bruit de fond (240 Bq/kg C) puis 30 % supplémentaires sont formés en présence d'une activité spécifique augmentée (450 Bq/kg C), puis les 40 % restants sont formés en présence d'une activité spécifique de l'air revenue à sa valeur initiale de 240 Bq/kg C. Dans ce cas, si le végétal est récolté à maturité, son activité spécifique moyenne est de 312 Bq/kg C.

La différence (20 %) entre les activités spécifiques en ¹⁴C des végétaux à maturité dans les cas ❶ et ❷, pour une augmentation identique de l'activité spécifique de l'air, montre que l'état du végétal au moment de cette augmentation peut significativement influencer les résultats des mesures.

2 Cf. Tsoularis et Wallace, 2002.

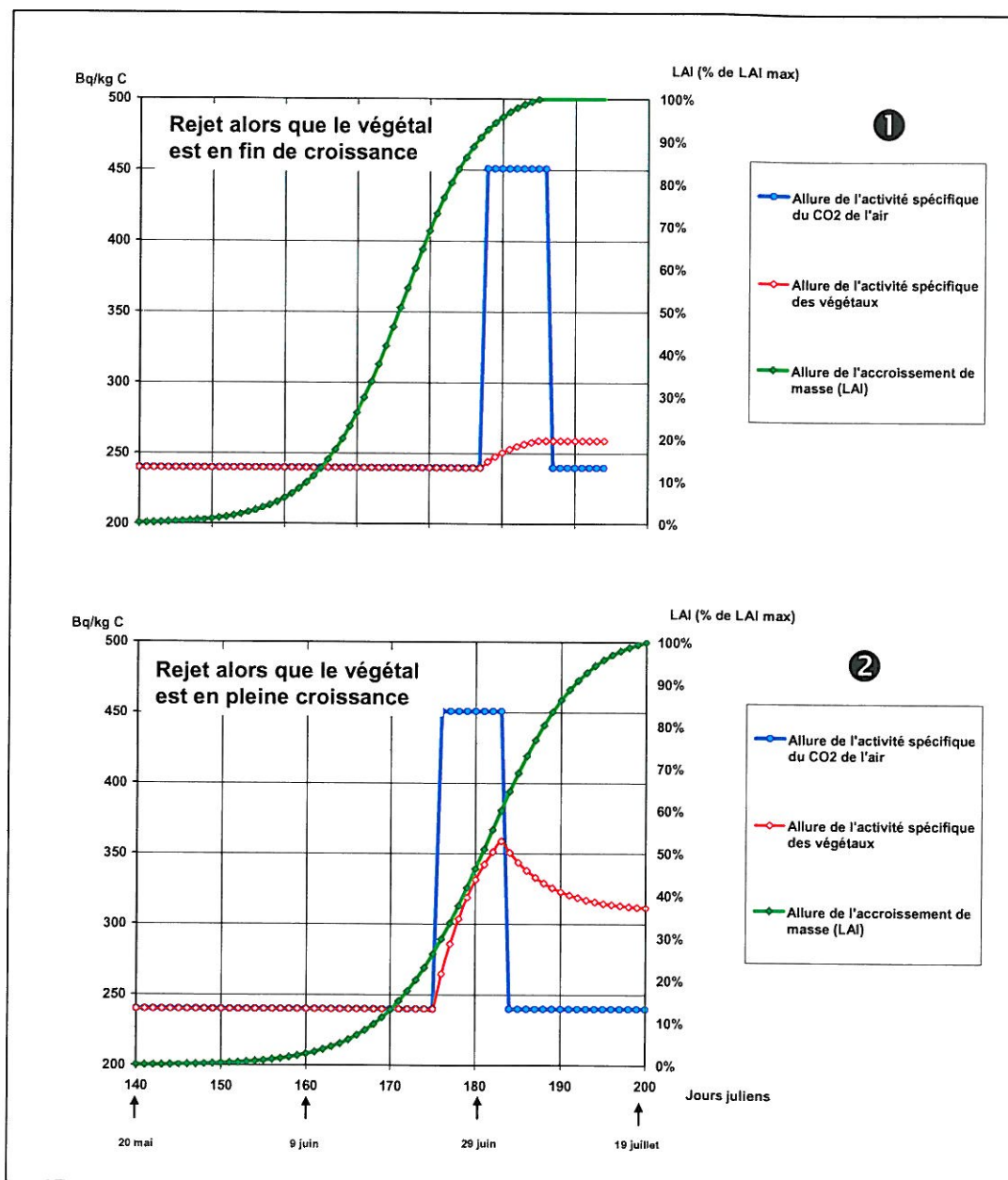


Figure permettant de visualiser l'évolution théorique simultanée de l'accroissement de masse (en vert) et d'activité spécifique en carbone 14 du végétal (en rouge) lorsque se produit une augmentation de durée limitée de l'activité spécifique de l'air en carbone 14 (en bleu).

Figure 3 : Illustration d'une courbe de croissance des végétaux couplée à la représentation de la variation de l'activité de l'air.

4.1.3 Incertitude relative à la zone potentiellement influencée

Une autre source d'incertitude provient de l'affectation des échantillons prélevés en 2008 en ZI (zone potentiellement influencée) et ZNI (zone potentiellement non influencée). En effet, l'examen des conditions météorologiques enregistrées dans la semaine du 25 juin au 2 juillet 2008 montre qu'une partie du rejet s'est effectuée par temps calme (1/4 du temps en conditions de vents de vitesses inférieures à 6 m/s) ; dans une telle situation, n'importe quel secteur autour du site a pu être temporairement affecté, mais avec des conséquences a priori faibles (cf. annexe de la lettre IRSN/DG/2008-456 du 8 août 2008). En outre, le rejet s'est poursuivi — faiblement — après la période 25 juin - 2 juillet, dans des conditions de dispersion non spécifiées.

Enfin, le voisinage immédiat d'autres installations complique l'interprétation des résultats, celles-ci étant soumises approximativement aux mêmes conditions météorologiques :

- l'usine Comurhex a une autorisation (2008) de rejet de 15 GBq/an de ^{14}C dans les rejets gazeux ;
- l'usine AREVA NC a une autorisation de rejet de 20 GBq/an dans les rejets gazeux (ses rejets réels ont été d'environ 2,5 GBq en 2006 et en 2007) ;
- le CNPE du Tricastin émet de l'ordre ³ de 600 GBq/an de ^{14}C en rejets gazeux (EDF, 2007). À noter que la limite de rejet autorisée pour ce CNPE est de 2 200 GBq/an pour le ^{14}C dans l'air (décision ASN du 13 mai 2008 fixant les limites de rejets pour le CNPE du Tricastin). Cette installation contribue à la majorité des rejets en ^{14}C sur la zone.

La notion de zone influencée (ZI) ou non (ZNI) est donc, comme dans le cas du bilan décennal, délicate à interpréter

4.2 Examen des résultats 2008 et comparaison avec les autres données disponibles

4.2.1 Observations générales

Le détail des résultats 2008 est reporté au tableau 1.

Les échantillons ont été affectés d'un indice ZI ou ZNI selon leur position par rapport à la zone théoriquement la plus influencée par le rejet de SOCATRI.

Pour les points situés dans les secteurs théoriquement les plus affectés par le rejet de SOCATRI, il n'y a pas de corrélation entre les activités spécifiques mesurées dans les échantillons et les valeurs théoriques de l'activité spécifique du CO_2 de l'air qui décroît avec la distance au point de rejet (figure 4) ; ceci n'est pas surprenant, compte tenu des nombreux paramètres susceptibles d'influer sur les activités spécifiques des végétaux, par rapport à une distribution théorique de leurs valeurs. Néanmoins, on observe que les valeurs des mesures se situent essentiellement au dessus de la ligne théorique du bruit de fond hors de toute influence (240 Bq/kg C).

Certains échantillons prélevés en zone potentiellement influencée (ZI) présentent des valeurs plus faibles qu'attendues (\searrow) (carotte-racines-17, fanes-carotte-5 et fanes-radis noir-4), imputables probablement à une photosynthèse faible durant les jours précédant le prélèvement (végétaux en fin de croissance) ; inversement, un prélèvement supposé se situer en zone non affectée (feuilles de chêne-10) présente par rapport à sa position une valeur élevée (\nearrow), que l'on peut difficilement mettre en relation avec l'événement du rejet SOCATRI. Néanmoins, cette valeur élevée (273 Bq/kg C) ne peut être que la conséquence d'une concentration de l'air en ^{14}C de cette

³ Estimation à partir des valeurs 2003-2006, publiées en moyenne par tranche 900 MWe du parc français.

zone supérieure à celle du bruit de fond, en coïncidence avec la phase de développement rapide des feuilles. L'origine de cette valeur élevée est probablement liée aux rejets du CNPE du Tricastin. En effet, ce point situé à quelques centaines de mètres au sud-est des 4 réacteurs du CNPE du Tricastin, est certainement sous l'influence de ceux-ci.

Les incertitudes métrologiques sont de l'ordre de 7,5 % (intervalle de confiance de 95 %), du même ordre que les différences entre les échantillons prélevés en ZI et en ZNI. La simple observation des données n'est donc pas totalement concluante quant à la réalité du marquage par le carbone 14 dans la ZI. Une analyse statistique des données est réalisée (cf. 4.2.2 et annexe 6.7) afin de vérifier si les différences observées entre ces zones sont significatives.

Les valeurs des résultats de mesures, exprimées en activités spécifiques, sont de l'ordre de grandeur de celles calculées à partir des évaluations dosimétriques de l'IRSN⁴ (cf. annexe 6.6). La gamme des valeurs calculées se situe en théorie :

- entre 244 et 259 Bq/kg de C, respectivement à 1 et 3 km de l'émission dans la zone théoriquement influencée, pour un végétal qui était en fin de croissance lors du rejet ;
- entre 255 et 312 Bq/kg de C, respectivement à 1 et 3 km de l'émission dans la zone théoriquement influencée, pour un végétal qui était en pleine phase de croissance lors du rejet.

⁴ Référence IRSN/DIR/2008-456 du 8 août 2008.

Tableau 1 : Résultats des mesures de ¹⁴C acquises en juillet et août 2008.

La description des unités et de leur signification est reportée § 6.1.

Date de prélèvement	Échantillon	Bq/kg C	Remarques	Zone théorique (e)
10/07/2008	radis noir racine 15	263±19	a, c	ZI
10/07/2008	fanés radis noir 4	275±19	a, c	ZI
10/07/2008	carotte racine 17	246±18	a, c ↘	ZI
10/07/2008	fanés carotte 5	246±18	a, c ↘	ZI
28/07/2008	salade TRI13	260±18	a	ZI
11/08/2008	herbe1	259±18	b	ZI
11/08/2008	feuilles chêne 1	249±18	b	ZI
11/08/2008	feuilles chêne 2	261±18	b	ZI
11/08/2008	feuilles peuplier 3	270±18	b	ZI
11/08/2008	feuilles chêne 4	247±18	b	ZI
11/08/2008	fanés navet 7	241±17	b ↘	ZI
11/08/2008	feuilles maïs 8	252±17	b, d	ZI
11/08/2008	feuilles maïs 9	258±18	b, d	ZI
11/08/2008	feuilles chêne 10	273±19	b ↗	ZNI
11/08/2008	salade 11	239±17	b	ZNI
11/08/2008	blettes 12	239±16	b	ZNI
11/08/2008	feuilles chêne 5	242±18	b	ZNI
11/08/2008	feuilles chêne 6	242±18	b	ZNI

a prélèvements effectués à l'occasion du suivi de l'incident SOCATRI du 7 juillet 2008.

b prélèvements spécifiques pour l'étude du rejet de ¹⁴C de SOCATRI.

c végétaux en fin de croissance (récolte en cours) : la synthèse de matière organique était probablement faible durant le rejet de ¹⁴C de SOCATRI.

d le maïs se distingue des autres échantillons végétaux en raison de son cycle photosynthétique particulier (cf. annexe 6.1).

e ZI zone potentiellement influencée ; ZNI, zone potentiellement non influencée.

↗ valeur particulièrement élevée par rapport à la position ZNI.

↘ valeur plus basse qu'attendue.

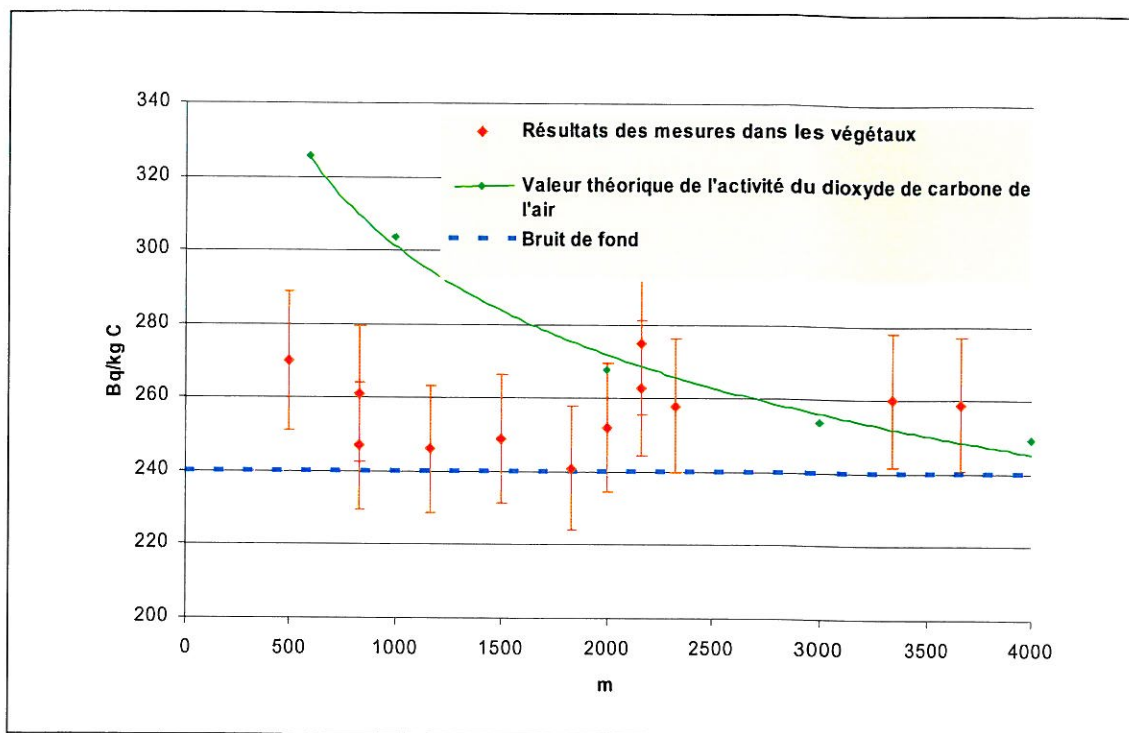


Figure 4 : Comparaison des activités spécifiques théoriques de l'air durant le rejet aux résultats de mesure des échantillons situés dans le secteur potentiellement exposé.

Les paramètres statistiques de description des résultats sont reportés figure 5, dans laquelle sont illustrées plusieurs séries de valeurs afin d'effectuer une première inter-comparaison de celles-ci :

- Tricastin 2008 (tous) : prise en compte de toutes les données acquises en 2008 sur la zone de site, indépendamment de la position ZI ou ZNI ;
- Tricastin 2008 (ZI) et Tricastin 2008 (ZNI) : pré-classement des données selon leur position théorique en zone influencée ou non, comme indiqué au tableau 1 ;
- Tricastin 2008 (ZI corrigé) : exclusion des 3 valeurs apparemment trop faibles (carotte-racines-17, fanes-carotte-5 à 246 Bq/kg C et fanes-navet 7 à 241 Bq/kg C) ;
- Tricastin 2008 (ZNI corrigé) : exclusion de la valeur apparemment trop élevée (feuilles de chêne-10) ;
- Opera 2007-2008 : série ayant servi à déterminer le bruit de fond moyen, hors de toute influence.

Le simple examen de ces données montre que :

- les valeurs Tricastin 2008 ZNI (corrigées ou non) se situent à un niveau comparable à celles du bruit de fond OPERA. Ceci montre que la valeur de référence moyenne française de 240 Bq/kg C est également valide pour la zone du Tricastin, en 2008, hors de toute influence ;
- les valeurs Tricastin 2008 ZI (corrigées ou non) sont très sensiblement supérieures au bruit de fond (255 à 258 vs 240 Bq/kg) ;
- l'ensemble des valeurs Tricastin 2008 se situe évidemment entre le bruit de fond et les valeurs Tricastin 2008 ZI ;

	OPERA 2007-2008	Tricastin 2008 (ZNI corrigé)	Tricastin 2008 (ZNI)	Tricastin 2008 (ZI)	Tricastin 2008 (ZI corrigé)	Tricastin 2008 (tous)	
Maximum (symbole ◦ supérieur)	246	242	273	275	275	275	Activités spécifiques (Bq/kg C)
q3 (trait supérieur de la boîte)	242	242	242	261	263	261	
Médiane (symbole –)	240	241	247	256	259	253	
q1 (trait inférieur de la boîte)	240	239	239	247	254	243	
Minimum (symbole ◦ inférieur)	227	239	239	241	247	239	
Effectif	10	4	5	13	10	18	

q3 : 75 % des résultats inférieurs à la valeur de q3 ; q1 : 25 % des résultats inférieurs à la valeur de q1

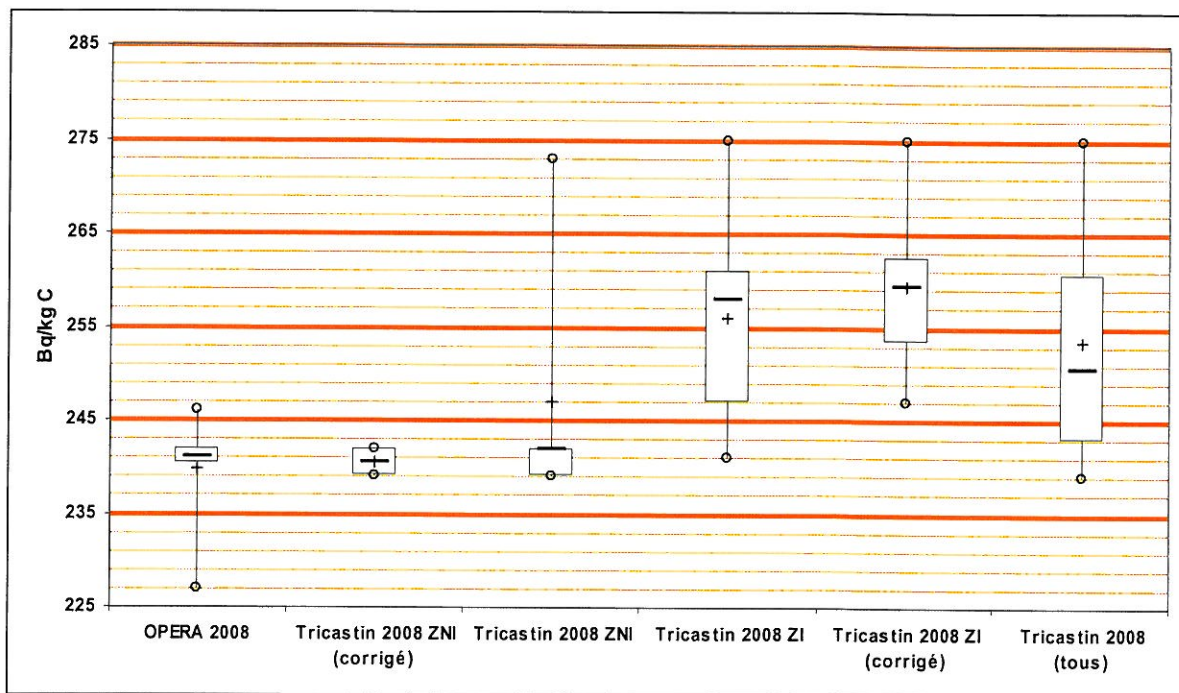


Figure 5 : Statistiques descriptives - comparaison du bruit de fond et des mesures Tricastin 2008.

4.2.2 Tests statistiques

En raison des incertitudes de mesure, la simple observation des données n'est pas concluante quant à la réalité du marquage par le carbone 14 dans la ZI.

Pour vérifier plus sûrement que la différence observée sur les diverses séries est significative, nous utilisons le test classique T de Student, avec un indice de confiance $\alpha = 0,05$ (c'est-à-dire 5 chances sur cent de se tromper en rejetant l'hypothèse testée, cf. détails en annexe 6.7). Il convient de souligner que les tailles des « échantillons statistiques » sur lesquelles sont effectués ces tests sont faibles et que, dans certains cas, l'hypothèse de normalité n'est pas totalement respectée. Néanmoins, le test de Student est relativement robuste (une distorsion modérée des séries testées avec la loi normale et avec l'hypothèse d'homogénéité des variances est acceptable), ce qui conduit à considérer comme acceptables les résultats des tests statistiques que nous allons décrire, dans la limite de tous les biais d'interprétation qui ont été listés précédemment.

Un premier test est effectué en comparant, d'une part les données représentatives du bruit de fond 2008 hors de la zone de site {OPERA 2007-2008}, et, d'autre part, les données acquises en 2008 sur la zone de site à partir des prélèvements situés en zone théoriquement non influencée avec ou sans correction, c'est-à-dire {Tricastin 2008 ZNI} et {Tricastin 2008 ZNI (corrigé)}. Rappelons que la correction consiste à enlever de la série le résultat chène-10 qui présente une valeur d'activité spécifique de 273 Bq/kg C, notablement plus élevée que le bruit de fond normal et vraisemblablement représentative d'une influence du CNPE du Tricastin.

Malgré le faible nombre de données, il apparaît clairement, dans les résultats des tests présentés en annexe 6.7, page 32, que :

- les séries {OPERA 2007-2008} et {Tricastin 2008 ZNI} présentent des moyennes et des variances différentes : ces séries sont différentes ;
- les séries {OPERA 2007-2008} et {Tricastin 2008 ZNI (corrigé)} présentent des variances et des moyennes égales : ces séries peuvent être considérées comme similaires et l'on peut faire l'hypothèse que l'ensemble de ces mesures représente correctement le bruit de fond hors influence.

→ Hors influence, le niveau de l'activité spécifique moyenne en ^{14}C des végétaux terrestres sur la zone du Tricastin est en 2008 de 240 Bq $^{14}\text{C}/\text{kg C}$, égal à celui des autres régions françaises.

Le deuxième test consiste à comparer le pool des données « bruit de fond », précédemment défini, aux observations faites en zone influencée.

Celles-ci sont constituées :

- soit des données {Tricastin 2008 ZI}, sans correction ;
- soit des données {Tricastin 2008 ZI (corrigées)}. La correction consiste ici, rappelons-le, à exclure de l'analyse les 3 résultats qui ont été jugés a priori trop faibles (carottes et fanes à 246 Bq/kg C et fanes de

navet à 241 Bq/kg C). Cette correction n'affecte pas le sens des résultats du test statistiques (détaillé en annexe 6.7, page 33).

→ Dans les deux cas, le test permet de montrer une différence significative des moyennes entre les séries « bruit de fond » et les séries « zone potentiellement influencée » : 256 à 259 Bq/kg C contre 240 Bq/kg C, soit un renforcement du bruit de fond d'environ 7,5 % (+ 18 Bq/kg C environ).

En outre, s'il est vraisemblable que le rejet de SOCATRI du 25 juin au 2 juillet 2008 a participé à ce léger marquage, il est très probable que ce rejet n'y a pas contribué seul mais qu'une partie du marquage est imputable aux rejets du CNPE du Tricastin depuis le début de la période de croissance des organes végétaux prélevés.

Lors de la campagne réalisée sur ce site en 2001, le renforcement mesuré du bruit de fond était en moyenne de + 3 % en zone influencée par le CNPE du Tricastin. Les rejets de carbone 14 du CNPE sur la période 2003-2007⁵ fluctuent, sans tendance notable d'évolution, entre 560 et 600 GBq/an⁶. Si l'on suppose qu'en 2001 et en 2008 ces rejets n'ont pas varié sensiblement par rapport aux valeurs moyennes du parc et que le renforcement de l'activité spécifique du carbone 14 observé en 2001 (+ 3 %) représente une valeur habituellement imputable au CNPE, ce qu'il est impossible d'affirmer avec certitude, alors le rejet de SOCATRI du 25 juin au juillet 2008 a contribué, au plus, à un accroissement de 4 à 5 % supplémentaires (environ + 10 Bq ¹⁴C/kg C). Cette dernière déduction est très vraisemblablement un majorant de l'impact de ce rejet particulier.

4.2.3 Évaluation dosimétrique

Une estimation simplifiée de l'accroissement de la dose efficace peut être faite pour cette augmentation de l'activité spécifique de + 10 Bq ¹⁴C/kg C sur la zone influencée, correspondant à l'hypothèse majorante de l'impact environnemental du rejet de Socatri du 25 juin au juillet 2008.

La formulation simplifiée de l'AIEA (AIEA, 2001) permet le calcul de la dose efficace à l'adulte par ingestion (qui représente de très loin la voie d'exposition prépondérante pour le carbone 14).

⁵ Il n'y a pas de données disponibles relatives au seul ¹⁴C avant 2003.

⁶ Estimation à partir des valeurs 2003-2006, publiées en moyenne par tranche 900 MWe du parc français.

Pour un individu adulte consommant durant 3 mois une nourriture totalement et exclusivement issue de la zone influencée, cette dose est égale au produit suivant :

$$D = FD \times R_c \times [^{14}\text{C}]$$

D	Dose efficace par ingestion pour l'adulte (Sv).
FD	Facteur de dose efficace par ingestion du carbone 14, égal à $5,8 \times 10^{-10}$ Sv/Bq.
R_c	Masse de carbone ingérée durant la période (kg), soit 27 kg en 90 jours, en se basant sur la consommation standard de la CIPR de 300 g de C par jour pour la totalité des denrées ingérées (ce chiffre est majorant, puisqu'il inclut toutes les denrées, y compris les plus riches en carbone : céréales, sucre...).
^{14}C	Activité spécifique ajoutée en moyenne dans les denrées, ici prise égale à 10 Bq/kg C.

Pour les conditions décrites ci-dessus, majorantes en termes de consommation alimentaire de carbone et d'autarcie, l'augmentation de la dose efficace par ingestion serait de + 0,16 μSv , soit une augmentation d'environ 2 % de la dose liée au bruit de fond naturel actuel en ^{14}C . Cette valeur est en bon accord avec les évaluations dosimétriques de l'IRSN (également majorantes) faites en août 2008 ⁷ puisque la dose ajoutée calculée variait de 0,5 à 0,09 μSv respectivement entre 600 m et 3 km de distance par rapport au point de rejet, sous les vents dominants.

5 Conclusion

L'épisode de rejet de carbone 14 du 25 juin au 2 juillet 2008, venant de l'usine SOCATRI, a faiblement marqué l'environnement en zone proche du site sous les vents dominants. Cette zone sous influence des rejets de l'usine SOCATRI étant elle-même sous l'influence des rejets atmosphériques de carbone 14 du CNPE du Tricastin, les marquages observés lors des campagnes de prélèvement réalisées en juillet et en août par l'IRSN ne peuvent pas être entièrement attribuables à cet épisode de rejet de SOCATRI. Par rapport au bruit de fond en carbone 14 (240 Bq $^{14}\text{C}/\text{kg C}$ en 2008), l'augmentation due aux rejets normaux du CNPE de Tricastin a été estimée, à partir de mesures faites en 2001, à environ + 3 % ; l'augmentation imputable à l'épisode de rejet de SOCATRI est estimée au maximum à + 4 à + 5 % supplémentaires, ce qui induirait une augmentation de l'activité spécifique des végétaux d'environ + 10 Bq $^{14}\text{C}/\text{kg C}$. Cette augmentation aurait entraîné, dans le cas le plus pénalisant de consommation de denrées locales, un supplément de dose efficace par ingestion inférieure à 0,2 μSv .

⁷ IRSN/DIR/2008-456 du 8 août 2008.

6 Annexes

6.1 Unités et signification des divers modes d'expression des résultats.

Les résultats de mesure relatifs au carbone 14 sont exprimés en **activité spécifique** (becquerels de ^{14}C par unité de masse de carbone $^{12}\text{C}+^{13}\text{C}$).

L'hypothèse consensuelle qui prévaut actuellement est, qu'à l'équilibre, l'activité spécifique du carbone des végétaux et des animaux terrestres est la même que celle du CO_2 de l'atmosphère (Quinault et al., 1998). En réalité, il existe un fractionnement isotopique lors de la photosynthèse du ^{14}C et du ^{13}C par rapport au ^{12}C . Le fractionnement sur le ^{14}C est (presque) égal à deux fois le fractionnement sur le ^{13}C . Conventionnellement, cette discrimination isotopique est exprimée par $\delta^{13}\text{C}$. Le $\delta^{13}\text{C}$, exprimé en pour mille, est égal à $1/10^\circ$ du pourcentage du rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ de l'échantillon par rapport à celui de la référence absolue conventionnelle (PDB, Bélemnite de la formation PeeDee, Crétacé, Caroline du Sud, USA) dont le $\delta^{13}\text{C}$ est égal à 0 par définition. Ainsi, les rapports $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ et $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ sont-ils plus faibles dans les tissus végétaux que dans le CO_2 atmosphérique (dont le $\delta^{13}\text{C}$ est voisin de -8‰) ; cette discrimination dépend des espèces selon leur cycle photosynthétique dominant. Elle est maximale pour les arbres ainsi que pour la plupart des plantes des zones tempérées ou froides. Ces végétaux sont dits « C3 » (fixation du CO_2 en formant 2 molécules à 3 atomes de carbone). Ils ont normalement un $\delta^{13}\text{C}$ qui varie de -20 à -35‰ avec une moyenne de -27‰ . Les plantes dites « C4 » captent le CO_2 pour former une molécule à 4 atomes de carbone ; ce sont, pour l'essentiel, des graminées tropicales, certaines halophytes — plantes adaptées aux sols salés — ainsi que le maïs et le sorgho. Leur $\delta^{13}\text{C}$ est en moyenne de -13‰ et varie de -9 à -17‰ . Quelques espèces (e.g. cactus) utilisent les cycles photosynthétiques C3 et C4 et ont un $\delta^{13}\text{C}$ intermédiaire.

La prise en compte de ce fractionnement, incontournable en datation isotopique, améliore très légèrement ($\approx 1\%$) la précision des comparaisons de mesures de ^{14}C dans différents échantillons du milieu terrestre. Une façon simple de le considérer est, notamment, de calculer le pourcentage de carbone moderne (PCM), qui était par convention égal à 100 % avant l'année de référence 1950. Nous ne disposons pas de la totalité des résultats qui permettraient de compléter les valeurs d'activité spécifiques par celles des PCM correspondants, néanmoins, le simple examen des activités spécifiques se révèle particulièrement robuste (à condition que les mesures aient été faites par une méthode « bas bruit de fond » par exemple, par synthèse du benzène) et permet généralement de conclure avec certitude à un impact ou une absence d'influence.

6.2 Conditionnement des échantillons et mesures.

Les échantillons sont lyophilisés ou séchés et broyés.

Les échantillons sont ensuite soumis à une combustion lente en bombe à combustion à 800 °C, en présence d'oxygène, ce qui permet de libérer le dioxyde de carbone ($C + O_2 \rightarrow CO_2$). Le CO_2 des échantillons est ensuite chauffé (600 - 800 °C) en présence de lithium, ce qui provoque la réaction : $2 CO_2 + 10 Li \rightarrow Li_2C_2 + 4 LiO$ et aboutit à la formation de carbure de lithium et d'oxyde de lithium. Après refroidissement, l'action de l'eau sur le carbure de lithium donne de l'acétylène et de l'hydroxyde de lithium par la réaction $Li_2C_2 + H_2O \rightarrow C_2H_2 + 2 LiOH$. L'acétylène extrait par sublimation est capté, après purification, sur un catalyseur à base d'alumine recouvert de chrome-vanadium où s'opère, à 185 °C environ, la trimérisation qui donne naissance au benzène : $3 C_2H_2 \rightarrow C_6H_6$. Le carbone 14 présent dans l'échantillon de benzène est alors mesuré par scintillation liquide à bas bruit de fond après ajout d'un liquide scintillant ad hoc, ce qui permet de déduire directement l'activité spécifique de l'échantillon sans mesure du carbone stable.

6.3 Résultats des mesures de ^{14}C acquises dans le cadre d'OPERA terrestre en 2007-2008

Station	Échantillon	Date	^{14}C Bq/kg C	$\delta^{13}\text{C}$ ‰ (8)	ASN ⁹ Bq/kg C	PCM ¹⁰ %
Aubure (Vosges)	Chêne sessile - feuilles	07/08/2007	241±18	-26,91	241,9	107
Chambon sur Lac (Montagne noire)	Chêne sessile - feuilles	18/09/2007	242±16	-29,03	244,0	108
Col de Salette (Clermont-Ferrand)	Chêne sessile - feuilles	19/09/2007	243±19	-27,13	244,0	108
Fontienne (Banon)	Chêne sessile - feuilles	28/09/2007	241±17	-28,42	242,6	107
Pont de Buis (Bretagne)	Lait de vache	03/01/2008	235±17	-29,58	237,2	105
Pont de Buis (Bretagne)	Tomme au lait de vache	03/01/2008	241±18	-29,60	243,2	108
Quimper (Bretagne)	Porc - muscle ¹¹	03/01/2008	242±18	-22,61	240,8	107
Plouéan (Bretagne)	Chou -feuilles ¹²	04/01/2008	227±17	-27,67	228,2	101
Plouéan (Bretagne)	Chou-fleur - feuilles	04/01/2008	240±17	-28,78	241,8	107
Plouéan (Bretagne)	Œuf de poule (décoquillé)	04/01/2008	246±16	En attente	-	-

⁸ Facteur de discrimination isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ de l'échantillon par rapport à celle d'un standard dont le $\delta^{13}\text{C}$ est de -25 ‰. Il est admis que la discrimination isotopique $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ est double de celle du ^{13}C .

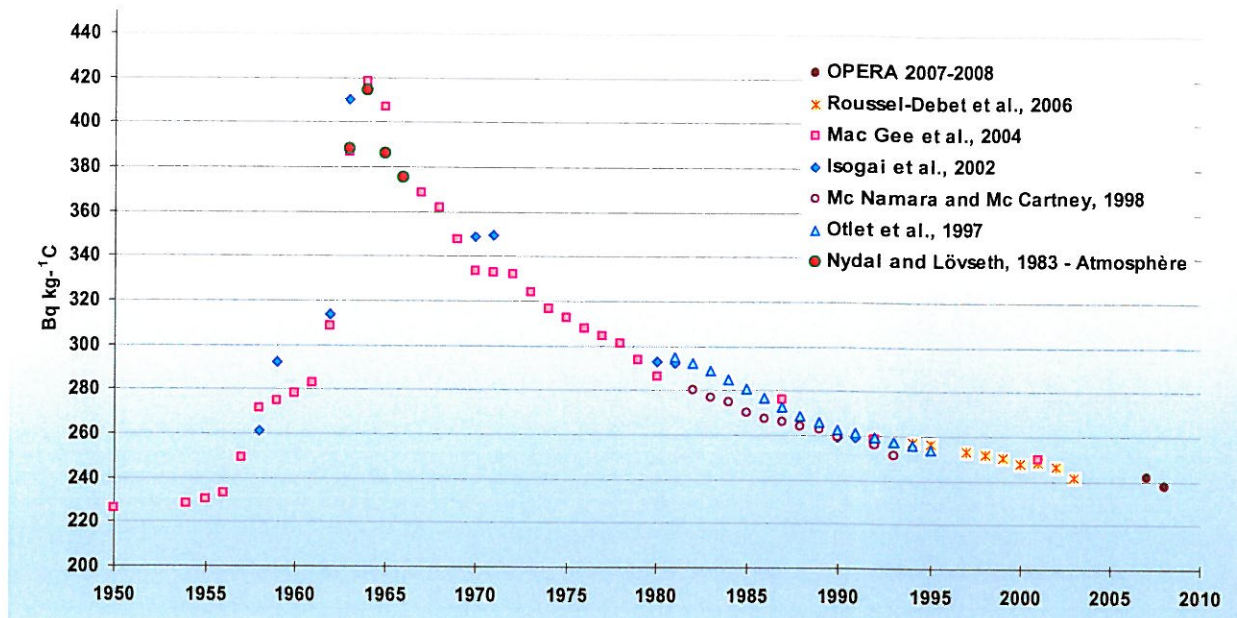
⁹ Activité Spécifique Normalisée : activité spécifique du ^{14}C de l'échantillon, normalisée par son $\delta^{13}\text{C}$.

¹⁰ Pourcentage de Carbone Moderne PCM = $100 \times \text{ASN} / 226$ (la valeur de 226 Bq/kg C correspond au bruit de fond naturel, pré-industriel). On peut remarquer qu'en valeurs normalisées par le ^{13}C , le PCM est de l'ordre de 105 à 110 %, donc très proche du niveau ante-1950, par définition égal à 100 %.

¹¹ Animal probablement nourri avec une ration comportant du maïs : le maïs est quasiment le seul végétal des zones tempérées à cycle C3 et ayant un $\delta^{13}\text{C}$ moyen de l'ordre de -13 ‰ alors que le $\delta^{13}\text{C}$ de la plupart des autres végétaux (cycle C4) est en moyenne de -20 à -35 ‰. Selon la proportion de maïs dans la ration, le $\delta^{13}\text{C}$ des animaux peut donc être abaissé, ce qui est le cas ici.

¹² Valeur d'activité spécifique anormalement basse, sans explication évidente.

6.4 Courbe générale d'évolution du ^{14}C dans la biosphère terrestre.



À l'échelle de cette courbe, les valeurs OPERA 2007-2008 ont été considérées comme les autres données, i.e. en tant que moyennes annuelles. La décroissance apparente correspond à une demi-vie de l'ordre de 98 ans (corrélation exponentielle, $R^2 = 0,86$).

6.5 Données issues de l'étude décennale du CNPE du Tricastin

6.5.1 Résultats des mesures de ^{14}C obtenues à l'occasion de l'étude décennale de Tricastin.

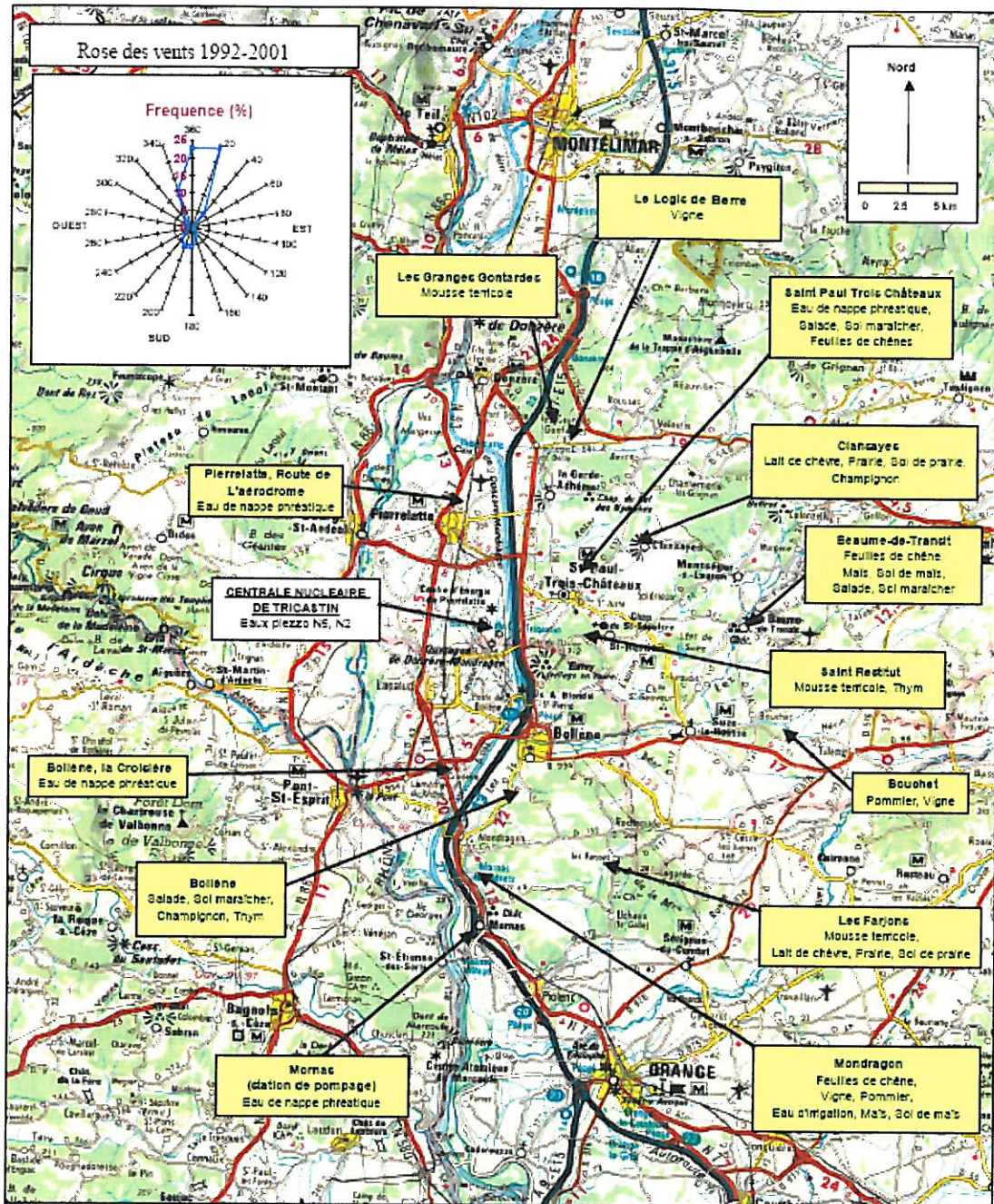
(Gontier et al., 2006)

Station	Date	Espèce	Position ¹³	^{14}C Bq/kg C	$\delta^{13}\text{C}$ ‰	ASN Bq/kg C	PCM %
Champredon - Bollène	21/08/2001	Salade	ZI	261,9±6,2	-27,34	289	128
Champredon - Bollène	23/10/2001	Champignon	ZI	258,3±6,3	-24,44	284	126
Le Pas d'Arles, Mondragon	19/07/2001	Chêne - feuilles	ZI	250,2±6,5	-27,44	276	122
Le Pas d'Arles, Mondragon	24/09/2001	Vigne - feuilles	ZI	263,6±6,4	-25,03	290	128
Les Massannes, Mondragon	21/08/2001	Pommier -fruit	ZI	257,8±6,5	-25,93	284	126
Beaume-de-Transit	19/07/2001	Chêne -feuilles	ZNI	247,8±6,5	-26,92	274	121
Beaume-de-Transit	21/08/2001	Salade	ZNI	251,5±6,3	-27,77	278	123
Bouchet	20/08/2001	Pommier -fruit	ZNI	251,5±6,6	-25,69	277	123
Bouchet	25/09/2001	Vigne - feuilles	ZNI	255,7±6,6	-23,75	281	124
Cbe billard, Le Logis de Berre	24/09/2001	Vigne - feuilles	ZNI	250,8±6,7	-25,18	276	122
Clansayes, Les Evignoles	19/04/2001	Herbe	ZNI	249,3±6,7	-28,57	276	122
Clansayes, Les Evignoles	19/04/2001	Lait de chèvre	ZNI	248,0±6,6	-28,28	274	121
Clansayes, Les Evignoles	25/10/2001	Champignon	ZNI	250,2±6,8	-25,03	275	122
Les Farjons, est de Mondragon	18/04/2001	Herbe	ZNI	248,5±6,6	-30,23	276	122
Les Farjons, est de Mondragon	18/04/2001	Lait de chèvre	ZNI	250,0±6,7	-27,46	276	122
Saint-Paul-Trois-Châteaux	19/07/2001	Chêne pubescent - feuilles	ZNI	249,7±6,5	-26,88	276	122

¹³ ZI : zone potentiellement influencée (compte-tenu des directions moyennes du vent par secteurs) ;

ZNI : zone non influencée.

6.5.2 Localisation des prélèvements effectués dans le cadre du bilan décennal du site du Tricastin.
 (Gontier et al., 2006).



6.5.3 Fréquences et vitesses de vent

Site du Tricastin - valeurs mesurées à 10 m de janvier 1994 à décembre 2002.

a) Rose des vents moyenne annuelle, selon la vitesse du vent

Secteur d'origine	Calmes ou nuls	Fréquence pour mille						Vitesse moyenne m/s
		[0,5-1[m/s	[1-2[m/s	[2-3[m/s	[3-7[m/s	[7-13[m/s	>=13 m/s	
20		12	22	22	115	88	4	5,8
40		11	14	7	23	13	1	4,1
60		10	8	2	2	1	0	1,8
80		6	4	1	0	0	0	1,0
100		3	2	0	0	0	0	1,1
120		3	3	1	0	0	0	1,3
140		3	3	2	2	2	0	3,3
160		3	5	5	14	3	0	3,8
180		4	10	10	15	1	0	2,7
200		5	17	15	23	0	0	2,7
220		5	13	9	12	0	0	2,4
240		4	8	4	3	0	0	1,9
260		4	5	2	1	0	0	1,6
280		5	5	1	1	0	0	1,5
300		6	6	1	1	0	0	1,5
320		8	9	3	2	1	0	1,8
340		8	12	12	15	2	0	2,7
360		10	23	35	114	45	2	4,8
	77	110	169	132	343	156	7	

b) Rose des vents moyenne annuelle, selon le régime de précipitations

Secteur d'origine	Temps sec		Temps pluvieux	
	Fréquence pour mille	Vitesse moyenne m/s	Fréquence pour mille	Vitesse moyenne m/s
20	270	5,8	171	3,4
40	68	4,3	72	2,2
60	23	1,8	30	1,5
80	10	1,0	21	1,4
100	5	1,0	15	1,4
120	6	1,2	17	2,0
140	11	2,8	46	5,2
160	26	3,6	80	4,9
180	39	2,6	45	3,2
200	61	2,7	44	2,4
220	40	2,4	30	2,0
240	19	1,9	25	1,9
260	13	1,6	19	1,6
280	12	1,5	15	1,9
300	15	1,4	23	1,8
320	22	1,7	25	1,9
340	48	2,7	59	2,3
360	233	4,9	195	3,1
calmes	78		69	

6.6 Estimation des activités spécifiques théoriques des végétaux

L'estimation de l'activité spécifique théorique des végétaux dans la zone supposée la plus affectée par le rejet repose sur l'hypothèse¹⁴ d'un équilibre isotopique entre les activités spécifiques du CO₂ de l'air et des végétaux. La prise en compte simultanée de la croissance des végétaux et de l'augmentation temporaire du ¹⁴C dans l'atmosphère conduit à évaluer l'activité spécifique du végétal en fonction du temps par l'expression suivante :

$$[^{14}\text{C}]_{\text{vég}_j} = \frac{[^{14}\text{C}]_{\text{vég}_{j-1}} \times M_{j-1} + [^{14}\text{C}]_{\text{air}_j} \times (M_j - M_{j-1})}{M_j} \quad (\text{équation 1})$$

$[^{14}\text{C}]_{\text{vég}_j}$	Activité spécifique moyenne du végétal le jour j (Bq ¹⁴ C/kg C)
$[^{14}\text{C}]_{\text{air}_j}$	Activité spécifique du CO ₂ de l'air le jour j (Bq ¹⁴ C/kg C)
M_j	Masse du végétal le jour j, estimée à partir d'un modèle de croissance (kg)

Il est possible d'estimer par un calcul simplifié les activités spécifiques du CO₂ de l'air, ajoutées par le rejet, dans l'axe supposé du panache, à partir des évaluations dosimétriques de l'IRSN¹⁵, par le calcul simple résumé ci-après.

à...	600 m	1 km	2 km	3 km	Source des valeurs
Bq/m ³ ajoutés dans l'atmosphère	0,06	0,04	0,02	0,01	Cf. infra (¹⁶)
g de C sous forme CO ₂ /m ³ air	0,2	0,2	0,2	0,2	Cf. infra (¹⁷)
Bq/kg de C air ajoutés dans le CO₂ de l'air durant le rejet	284	211	89	45	Calcul

¹⁴ Hypothèse habituelle pour la modélisation du comportement du ¹⁴C en milieu terrestre.

¹⁵ Réponse de l'IRSN au courrier ASN-Dépt-Lyon-1100-2008 du 6 août 2008. Référence IRSN/DIR/2008-456 du 8 août 2008.

¹⁶ L'activité volumique du ¹⁴C dans l'atmosphère (Bq/m³) est directement déduite des doses par inhalation présentées dans l'évaluation IRSN, compte tenu des paramètres pris en compte dans cette évaluation : facteur de dose efficace par inhalation pour l'adulte de 6×10^{-12} Sv/Bq, taux d'inhalation de l'adulte de 22 m³/j et durée du rejet de 9 jours.

¹⁷ La proportion volumique du CO₂ dans l'atmosphère est actuellement de plus de 375×10^{-6} m³CO₂/m³ air (en 2003). La concentration du carbone dans le CO₂ est estimée à partir de la masse molaire du carbone (12 g/mol) et du volume molaire des gaz parfaits à la pression atmosphérique (22,4 l/mole), soit environ 0,537 kg C/m³CO₂.

En ajoutant le bruit de fond de 240 Bq/kg C, l'activité spécifique du CO₂ prise en compte (Bq/kg C) est la suivante :

	600 m	1 km	2 km	3 km
Jusqu'au 24 juin	240	240	240	240
25 juin - 2 juillet	524	451	329	285
À partir du 3 juillet	240	240	240	240

Ceci permet de calculer l'ordre de grandeur des activités spécifiques théoriques des végétaux prélevés au sud du site en appliquant l'équation 1. Nous avons fait cette évaluation pour deux stades végétatifs du végétal au moment du rejet : fin de croissance ① et pleine croissance ②, ce qui correspond à la gamme probable des stades végétatifs durant le rejet des échantillons récoltés en juillet-août 2008. Deux distances au rejet ont été considérées : 1 km et 3 km, afin d'en déduire les gammes de valeurs théoriques des activités spécifiques des végétaux, dans l'axe des vents les plus fréquents. Nous obtenons (tableau ci-après) une gamme de valeur allant de 244 à 312 Bq ¹⁴C/kg C selon l'état végétatif au moment du rejet et en fonction de la distance.

Période végétative au moment du rejet : fin de croissance				Période végétative au moment du rejet : pleine croissance			
①				②			
Date théorique	Développement du végétal *	Activité spécifique moyenne du végétal		Date théorique **	Développement du végétal*	Activité spécifique moyenne du végétal	
		Bq ¹⁴ C/kg C				Bq ¹⁴ C/kg C	
		1 km	3 km			1 km	3 km
Jusqu'au 24 juin	91%	240	240	Jusqu'au 24 juin	26 %	240	240
25 juin	93%	244	241	25 juin	30%	265	245
2 juillet	100%	259	244	2 juillet	60%	359	265
Après le 2 juillet	100%	259	244	À maturité (fin juillet)	100%	312	255

* Masse en % de la masse finale, par analogie avec le LAI correspondant à une courbe de croissance « légumes -feuille ».

Ces ordres de grandeur sont fournis à titre d'illustration car il faut souligner les nombreuses hypothèses qui sous-tendent ce calcul, et en particulier celles qui suivent :

- l'estimation de l'activité spécifique du CO₂ de l'air est entachée d'incertitudes ;
- le rythme de croissance des végétaux jusqu'à leur prélèvement n'est en réalité pas connu : la courbe de croissance théorique utilisée est celle d'un légume-feuille, alors que la variété des prélèvements s'accompagne forcément de courbes de croissance particulières, différentes selon les échantillons (en particulier, le gradient d'accroissement de surface foliaire est plus ou moins élevé) ; par ailleurs, l'assimilation de l'accroissement de la masse à celle de l'indice foliaire LAI est une approximation ;
- les évaluations reposent sur l'hypothèse d'équilibre isotopique immédiat et complet du ¹⁴C et du carbone stable entre l'air et le végétal, ce qui est également une approximation.

En dépit de ces incertitudes, l'ordre de grandeur des activités spécifiques « attendues » des végétaux dans la zone de prélèvement Z1 est en bon accord avec les mesures acquises.

6.7 Description de l'analyse statistique.

Séries testées

Séries « Bruit de fond »				Séries « zone potentiellement influencée »	
OPERA 2007-2008	Tricastin 2008 ZNI	Tricastin 2008 ZNI (corrigé)	OPERA 2007-2008 + Tricastin 2008 ZNI (corrigé)	Tricastin 2008 ZI	Tricastin 2008 ZI (corrigé)
246	273	---	246	275	275
243	242	242	243	270	270
242	242	242	242	263	263
242	239	239	242	261	261
241	239	239	242	260	260
241			242	259	259
241			241	258	258
240			241	252	252
235			241	249	249
227			240	247	247
			242	246	---
			242	246	---
			239	241	---
			239		

Préalable : test de la normalité

On considère que l'échantillon suit une loi normale (95 %) lorsque :

- la valeur de son aplatissement (Kurstosis) est comprise entre -2 et +2
- la valeur de son asymétrie est comprise entre -2 et +2

Bien que certaines séries ne soient pas distribuées suivant une loi normale, nous appliquons le test de Student qui reste valide même dans ce cas.

Test d'égalité des variances (F-Test) ; seuil de confiance 0,05

Ce test permet de savoir si les variances des séries sont homogènes ou non par comparaison de la variable F à la valeur critique. Si $F < F_{crit} \Rightarrow$ les variances sont différentes.

Test d'égalité des espérances - (T test) ; seuil de confiance 0,05

Ce test permet de vérifier si les espérances (par extension les moyennes) sont égales en comparant la valeur absolue de la variable T à sa valeur critique. Si $|t_{obs}| > T_{crit}$ on rejette l'hypothèse d'égalité des espérances \Rightarrow les moyennes sont différentes.

Vérification de l'hypothèse « les espérances des séries Tricastin 2008 ZNI (corrige ou non) et OPERA 2007-2008 sont égales » (i.e., la ZNI Tricastin est représentative du bruit de fond OPERA 2007-2008).

	OPERA 2007-2008	Tricastin 2008 (ZNI)	Tricastin 2008 (ZNI corrigé)
Moyenne	240	247	241
Variance	28	214	3
Kurtosis	4	5	-6
Asymétrie	-2	2	0
Minimum	227	239	239
Maximum	246	273	242
Nombre d'échantillons	10	5	4
Degré de liberté	9	4	3

F-Test	OPERA 2007-2008 vs Tricastin 2008 (ZNI)	OPERA 2007-2008 vs Tricastin 2008 (ZNI corrigé)
F	1.30E-01	9.24E+00
Valeur critique pour F (unilatéral)	2.75E-01	8.81E+00
Résultat	F < Fcrit ⇒ les variances sont différentes	F > Fcrit ⇒ les variances sont égales

T-test	OPERA 2007-2008 vs Tricastin 2008 (ZNI)	OPERA 2007-2008 vs Tricastin 2008 (ZNI corrigé)
Différence hypothétique des moyennes	0	0
Degré de liberté	5	12
Statistique t	-1.07E+00	-3.73E-01
Valeur critique de t (unilatéral)	2.02E+00	1.78E+00
Valeur critique de t (bilatéral)	2.57E+00	2.18E+00
Résultat	$ t_{obs} > T_{crit} \Rightarrow$ on rejette l'hypothèse d'égalité des espérances ⇒ les moyennes sont différentes	$ t_{obs} < T_{crit} \Rightarrow$ on accepte l'hypothèse d'égalité des espérances ⇒ les moyennes sont égales

Vérification de l'hypothèse « les espérances des séries OPERA 2007-2008 et Tricastin 2008 ZI ne sont pas égales» (i.e., la ZI Tricastin est différente du bruit de fond).

(en pratique, le test porte sur l'hypothèse inverse : les espérances sont égales)

	<i>OPERA 2007-2008</i>	<i>Tricastin 2008 ZI</i>
Moyenne	240	256
Variance	28	103
Kurtosis	4	-1
Asymétrie	-2	0
Minimum	227	241
Maximum	246	275
Nombre d'échantillons	10	13
Degré de liberté	9	12

F-Test	<i>OPERA 2007-2008 vs Tricastin 2008 ZI</i>
F	2.76E-01
Valeur critique pour F (unilatéral)	3.25E-01
Résultat	$F < F_{crit} \Rightarrow$ les variances sont différentes

T-test	<i>OPERA 2007-2008 vs Tricastin 2008 ZI</i>
Différence hypothétique des moyennes	0
Degré de liberté	19
Statistique t	-4.94E+00
Valeur critique de t (unilatéral)	1.73E+00
Valeur critique de t (bilatéral)	2.09E+00
Résultat	$ t_{obs} > T_{crit} \Rightarrow$ on rejette l'hypothèse d'égalité des espérances \Rightarrow les moyennes sont différentes

Vérification de l'hypothèse « les espérances des séries {OPERA 2007-2008 + Tricastin 2008 ZNI corrigé} et Tricastin 2008 ZI (corrigé) ne sont pas égales sont égales » (i.e., la ZI Tricastin corrigée est différente du bruit de fond).

(en pratique, le test porte sur l'hypothèse inverse : les espérances sont égales)

	{OPERA 2007-2008 + TRI2008 ZNI (corrigé)}	Tricastin 2008 ZI (corrigé)
Moyenne	240	259
Variance	20	77
Kurtosis	6	0
Asymétrie	-2	0
Minimum	227	247
Maximum	246	275
Nombre d'échantillons	14	9
Degré de liberté	13	10

F-Test	OPERA 2007-2008 + TRI2008 ZNI (corrigé) vs Tricastin 2008 ZI (corrigé)
F	0.261
Valeur critique pour F (unilatéral)	0.369
Résultat	F < Fcrit ⇒ les variances sont différentes

T-Test	{OPERA 2007-2008 + TRI2008 ZNI (corrigé)} vs Tricastin 2008 ZI (corrigé)
Différence hypothétique des moyennes	0
Degré de liberté	12
Statistique t	-6.43E+00
Valeur critique de t (unilatéral)	1.78E+00
Valeur critique de t (bilatéral)	2.18E+00
Résultat	tobs > Tcrit ⇒ on rejette l'hypothèse d'égalité des espérances ⇒ les moyennes sont différentes

7 Références

- AIEA (2001). *Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment*. Agence Internationale de l'Énergie Atomique, Safety series n° 19.
- EDF (2007). Bilan 2007 des rejets radioactifs et chimiques des CNPE en exploitation et des réacteurs en arrêt définitif. Nucléaire et environnement 2007, EDF- Division Production Nucléaire.
- Gontier G. et al (2006). *Étude radioécologique de l'environnement proche du Centre Nucléaire de Production d'Électricité de Tricastin : deuxième bilan décennal (2001)*. Rapport IRSN/DEI/SESURE n° 2006-05.
- Quinault JM, Roussel-Debet S, Garnier-Laplace J, Calmon P. (1998). *Modélisation des transferts du carbone 14 émis par les réacteurs à eau pressurisée en fonctionnement normal, dans l'environnement proche du site, dans les milieux aquatique d'eau douce et terrestre*. Rapport IPSN-DERS-SERE-98-007.
- Roussel-Debet S. (2007). Evaluation of ^{14}C doses since the end of the 1950s in metropolitan France. *Radioprotection*, 42:3, 297- 313.
- Roussel-Debet S. (2006) Évaluation des doses dues au ^{14}C , depuis la fin des années 1950, en France. Rapport IRSN/DEI/SESURE n° 2006-09.
- Roussel-Debet S., Gontier G., Siclet F. et Fournier M. (2006). Distribution of carbon 14 in the terrestrial environment close to French nuclear power plants. *Journal of Environmental Radioactivity*, 79: 171-185.
- Roussel-Debet S. (2001). *Carbone 14*. Rapport IPSN-DPEI- SERLAB 2001-09.
- Tsoularis A., Wallace J. (2002). Analysis of logistic growth models. *Mathematical Biosciences*, 179: 21–55.