



IRSN



BIOINDICATEURS & SUIVIS RADIOECOLOGIQUES : REX & CRITERES DE CHOIX

**Cécile BOYER, Pierre-Yves HÉMIDY,
Sophie CHAMPEL**



**Avec le concours de David CLAVAL pour l'exploitation
des données**

IRSN



Journées Techniques "Faune, flore, denrées et radioactivité"

Introduction ⁽¹⁾

La protection de l'environnement et du public au voisinage d'une installation nucléaire repose avant toute chose sur une **conception appropriée** des installations et sur la **rigueur d'exploitation au quotidien**.

⇒ C'est l'un des objectifs majeurs de la sûreté nucléaire.

Lorsqu'une installation nucléaire est en fonctionnement, l'exploitant doit réglementairement assurer une **auto-surveillance de l'environnement** dont les modalités sont établies en accord avec les autorités.

La Surveillance de la Radioactivité de l'Environnement (SRE) est cadrée par des **dispositions réglementaires/modalités spécifiques à chaque installation** et repose sur :

- Un **programme fixe de mesures périodiques** lié à la nature et la fréquence des rejets autorisés ;
- Des dispositifs de **prélèvements/mesures - ponctuels/continus**, et des **mesures en continu *in situ* en temps réel**.

Les matrices prélevées à une fréquence donnée dans le cadre de la stratégie de SRE peuvent être :

- Des **vecteurs directs de la radioactivité** (*eau; air*) ;
- Des **matrices d'accumulation** (*ex. sols et sédiments*) qui ont la capacité de révéler une influence ancienne comme celle des essais nucléaires atmosphériques et/ou des retombées d'accidents ;
- Des **produits de consommation** (*par les animaux ou les hommes*) ;
- Des **bioindicateurs** connus pour leur aptitude à retenir les éléments traces et à renseigner sur certaines caractéristiques écologiques de l'environnement (*ex. végétaux terrestres, bryophytes, phanérogames immergées,...*).



Introduction ⁽²⁾

La SRE (*routine*) est complétée par des mesures radioécologiques dites « bas bruit de fond » (expertise), de type réglementaires et/ou réalisées à l'initiative de l'exploitant.

Les bioindicateurs utilisés dans le cadre de la SRE sont issus des compartiments terrestre et aquatique et leur choix repose sur plusieurs critères :

- La complémentarité avec les analyses réalisées sur les autres types de matrices surveillées ;
- La représentativité vis-à-vis du milieu et de la zone géographique surveillés ;
- Leurs propriétés biologiques ;
- Leur aptitude à répondre aux objectifs assignés à la SRE et donc à la mesure à réaliser ([lien](#)).

La bonne intégration/prise en compte de ces critères requiert :

- Un haut niveau de connaissances techniques et scientifiques ;
- Une bonne connaissance du fonctionnement des écosystèmes et des transferts qui y siègent ;
- L'intégration du retour d'expérience et sa capitalisation.

⇒ **Ces éléments expliquent la nécessité pour l'exploitant d'avoir recours à des organismes extérieurs comme l'IRSN, organisme d'expertise reconnue, pour l'appuyer dans la réalisation de ce type de mesures et études.**

Introduction ⁽³⁾

Cette présentation est centrée sur le Retour d'EXpérience (REX) tiré de la surveillance radioécologique de l'environnement des sites EDF et sur les critères de choix des bioindicateurs établis sur la base des données acquises dans ce cadre.

L'exposé sera illustré de quelques exemples ciblés :

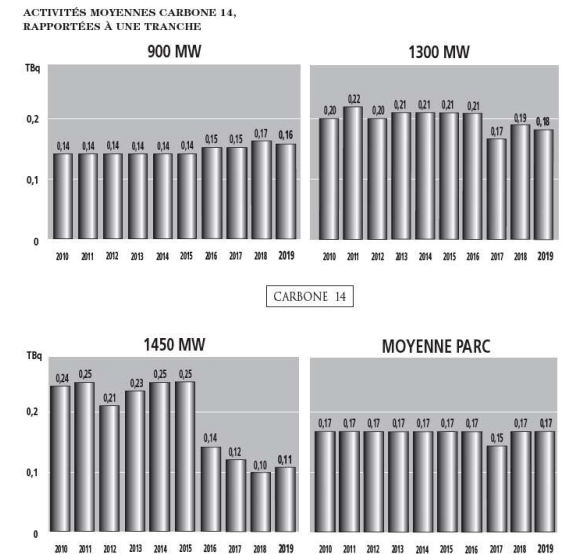
- ⇒ **Surveillance du ^{14}C en milieu terrestre** (*végétaux terrestres & lait*) ;
- ⇒ **Surveillance du ^{137}Cs en milieu terrestre** (*végétaux terrestres & lait*) ;
- ⇒ **Surveillance particulière du ^3H en milieu aquatique pendant un rejet dans le cadre d'une étude post-arrêt.**



Dans le compartiment terrestre

Surveillance du ^{14}C dans les végétaux terrestres et le lait

- ^{14}C : Un des principaux radionucléides rejetés par les CNPE en exploitation, avec une production annuelle proportionnelle à la quantité d'énergie/électricité produite, de l'ordre de 0,2 TBq/tranche/an (*sous formes gazeuses et rejeté à l'atmosphère*),
- Dose globale tous RN confondus faible ($\mu\text{Sv/an}$), mais contribution du ^{14}C potentiellement importante.
- Conformément à la réglementation - Décision « Environnement » 2013-DC-0360 modifiée & décisions « modalités » sites :
 - Mesures trimestrielles sur des végétaux (herbes ou lierre) prélevés dans une zone située sous les vents dominants à proximité du site (environ 1 km)
NB : Rapprochement des points de prélèvements au rythme des contraintes de terrain.
 - Mesure annuelle sur un prélèvement de lait produit au voisinage de l'installation (0 – 10 km)
NB : Prescription parfois difficile à respecter compte tenu de la diminution du nombre d'exploitations agricoles et à laquelle s'ajoute le fait que les parcelles de l'exploitation ne sont pas nécessairement sous les vents dominants.



Dans le compartiment terrestre

Surveillance du ^{14}C dans les végétaux terrestres (herbes ou feuilles de Lierre)

Observations sur la base des mesures réalisées entre 2015 et 2019 :

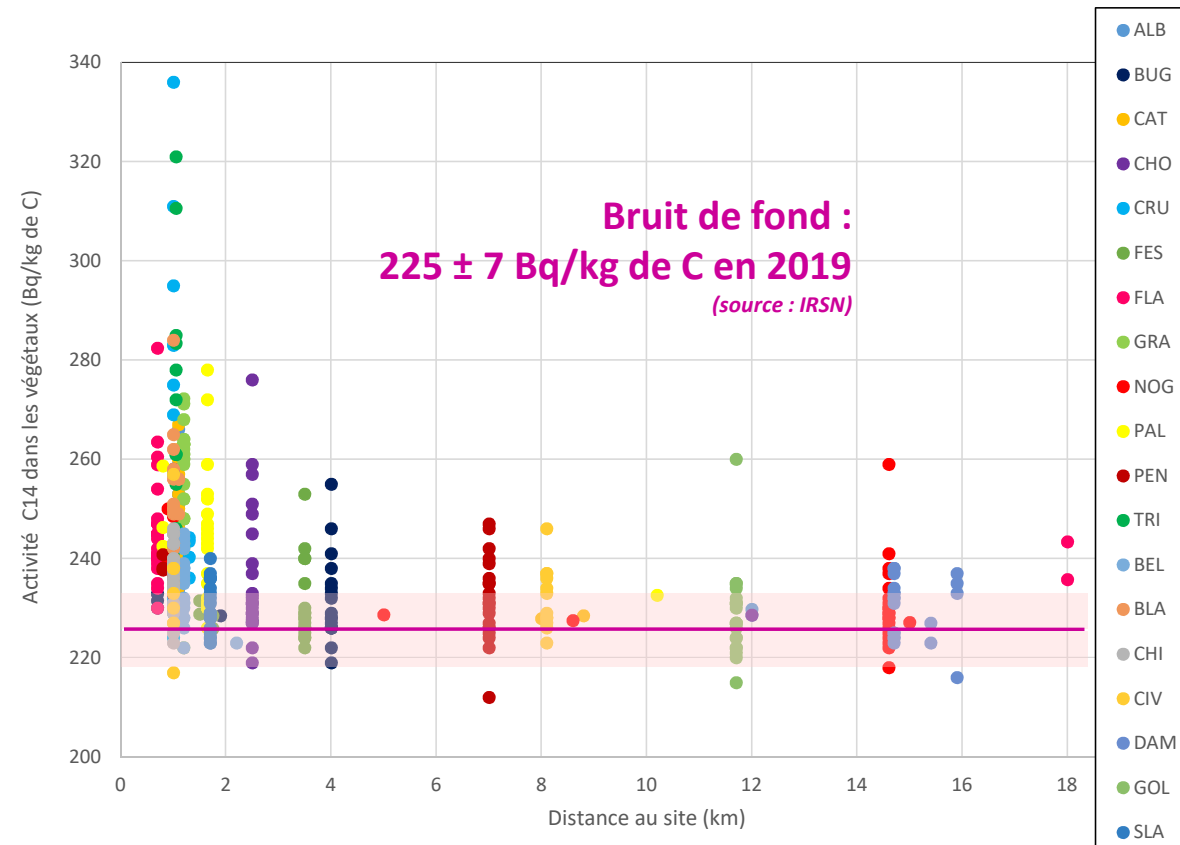
➤ Pas de corrélation simple avec les données trimestrielles de rejet, mais données non directement comparables compte tenu des dates de prélèvements/rejets et de la variabilité des conditions de dispersion dans le temps ;

➤ Effet « Saisonnalité » non mise en évidence ;

➤ Activités spécifiques > BDF dans les 3-4 premiers km;

➤ Baisse des activités spécifiques avec la distance au site fluctuant autour du BDF.

⇒ **Réaliser les prélèvements de végétaux dans une zone située sous les vents dominants à proximité du site (environ 1 km) est bien adapté aux objectifs assignés à la mesure.**



Dans le compartiment terrestre

Surveillance du ^{14}C dans le lait

Observations sur la base des mesures réalisées entre 2015 et 2019 :

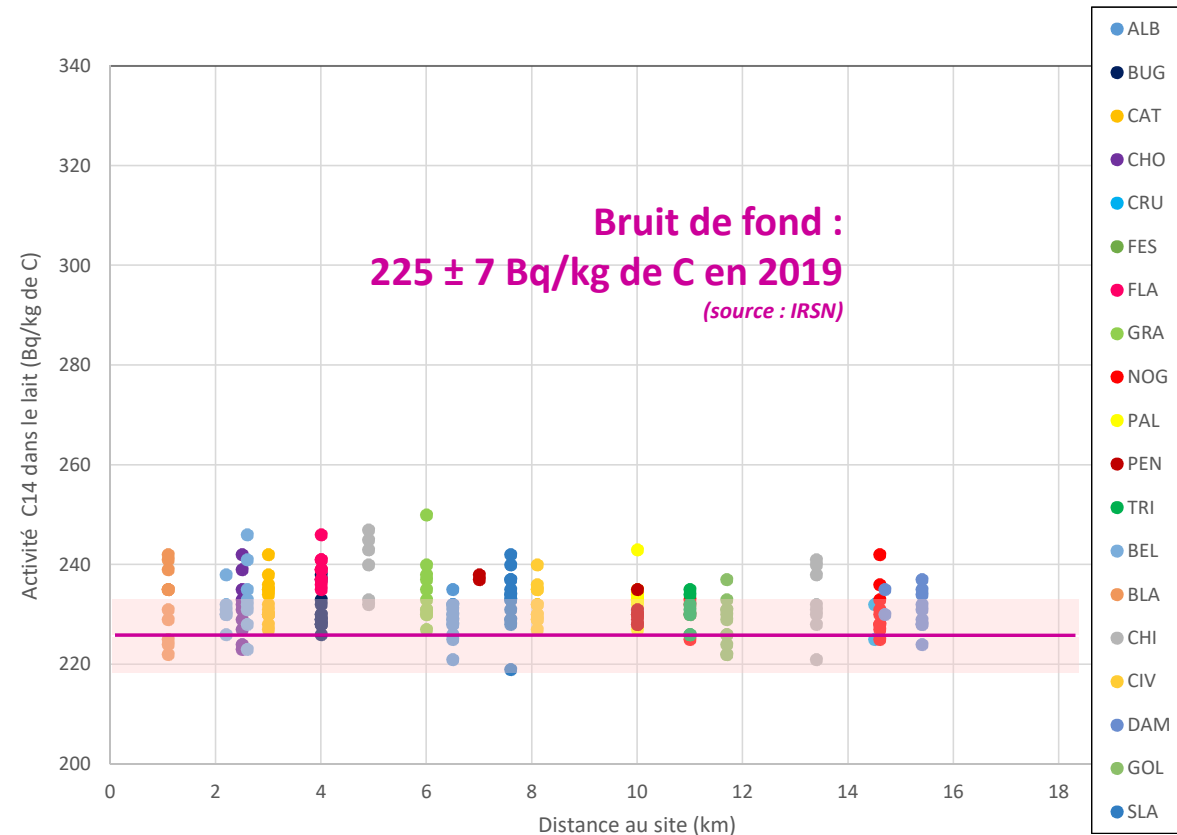
➤ Pas de corrélation simple avec les données trimestrielles de rejet, mais données non directement comparables, compte tenu de la localisation des exploitations qui ne peut pas toujours être sous les vents dominants et à laquelle peut s'ajouter un biais lié à une alimentation donnée au bétail potentiellement non locale ;

➤ Effet « Saisonnalité » non mise en évidence ;

➤ Influence de la distance peu marquée ;

➤ Activités spécifiques comprises dans la gamme de variation du BDF (ou > de qq Bq/kg de C).

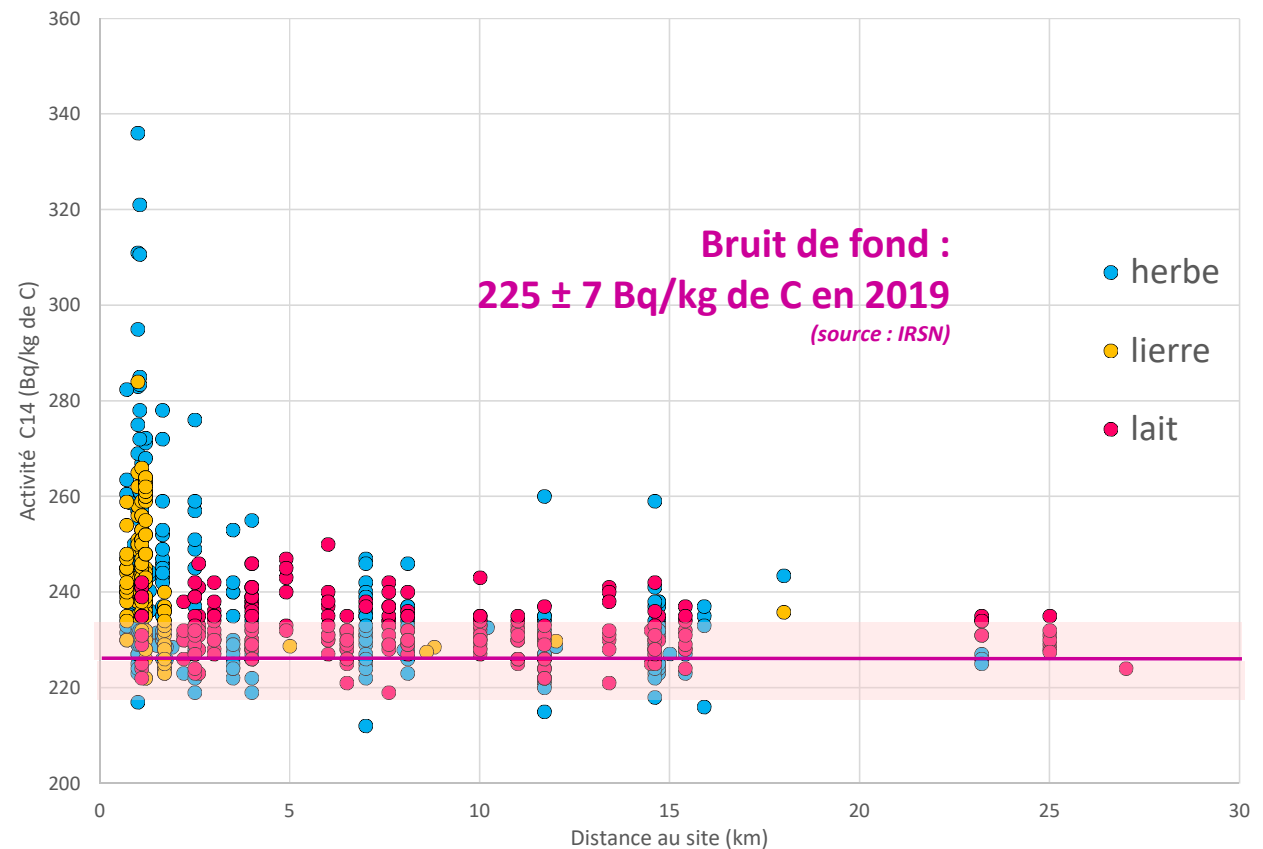
⇒ **Comparativement aux végétaux terrestres, les résultats de mesures sur le lait sont plus difficiles à exploiter compte tenu de l'origine des aliments et de la localisation des élevages.**



Dans le compartiment terrestre

Pertinence des indicateurs végétaux (herbe, feuilles de lierre) vs lait pour la surveillance du ^{14}C en milieu terrestre

- ⇒ Le REX montre que l'herbe & les feuilles de lierre sont des bio-indicateurs adaptés aux objectifs de surveillance locale du ^{14}C .
- ⇒ Les végétaux sont des indicateurs plus pertinents que le lait pour suivre les variations locales (premiers km) du niveau de ^{14}C dans l'environnement des CNPE.
- ⇒ En revanche, les analyses sur le lait répondent à d'autres enjeux, d'évaluation dosimétrique et de communication.



Dans le compartiment terrestre

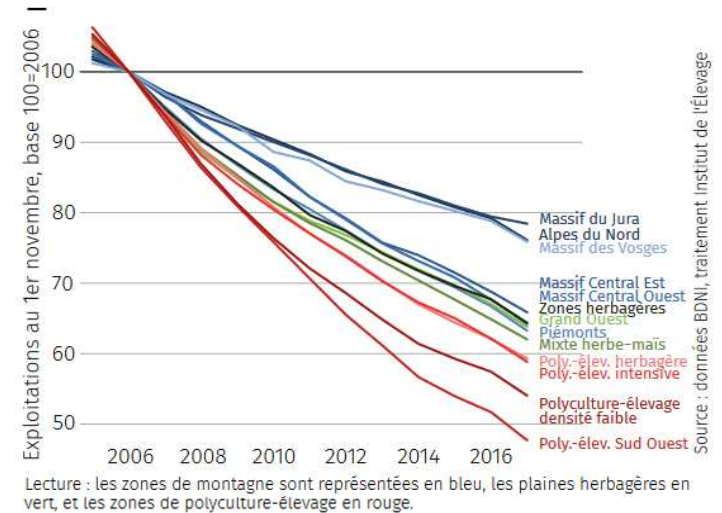
Surveillance du ^{137}Cs dans le lait

- ^{137}Cs : Rejets à l'atmosphère de l'ordre du MBq/an/CNPE ;
- Conformément à la réglementation (Décision « Environnement » 2013-DC-0360 modifiée & décisions « modalités » sites) :
 - Spectrométrie γ mensuelle sur un prélèvement de lait produit au voisinage de l'installation (0 – 10 km) (SD au max de 0,5 Bq/kg frais en ^{137}Cs pour les matrices biologiques consommées directement par l'homme) ;
 - Spectrométrie γ annuelle bas bruit de fond réalisée à l'initiative de l'exploitant (SD : 0,01 Bq/L).

⇒ Cette prescription est parfois difficile à respecter compte tenu de la diminution du nombre d'exploitations agricoles, point auquel s'ajoute le fait que l'exploitation trouvée n'est pas nécessairement idéalement placée par rapport aux vents dominants.

⇒ Les périodes de stabulation et/ou d'affouragement d'importation peuvent jouer sur la représentativité de la mesure et l'interprétation du résultat.

Évolution du nombre d'exploitations laitières entre 2005 et 2017 par zones de production



Dans le compartiment terrestre

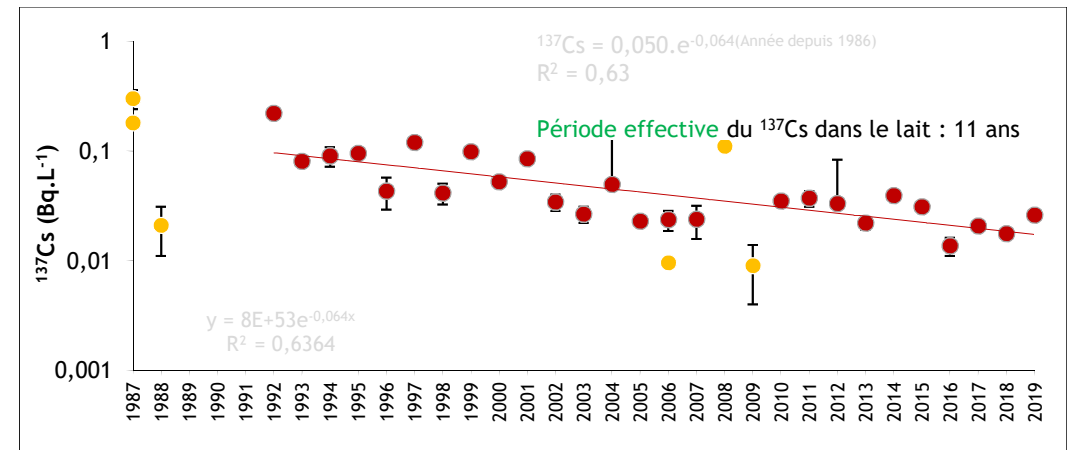
Surveillance du ^{137}Cs dans le lait

Observations sur la base des mesures réalisées entre 1987 et 2019 :

- Dans les cas, rares, où les mesures en spectrométrie γ ont pu être réalisées sur du lait provenant d'un même troupeau (Chooz, à 2 km sous les vents dominants) ;
- Une baisse constante de l'activité en ^{137}Cs est observée au cours du temps ;
- Une période effective en accord avec celle observée hors influence d'un rejet (Brimo *et al.*, 2019) ;

⇒ La contribution des rejets du site de Chooz ne peut être discriminée des autres sources de ^{137}Cs :

- Essais aériens d'armes nucléaires (1945 à 1981) ;
- Accident de Tchernobyl (1986) ;
- Et fugacement l'accident de Fukushima (2011).



Exemple dans l'environnement du site de Chooz (prélèvement en champ proche sous les vents)
(Points jaunes, écartés du calcul de la régression)

Dans le compartiment terrestre

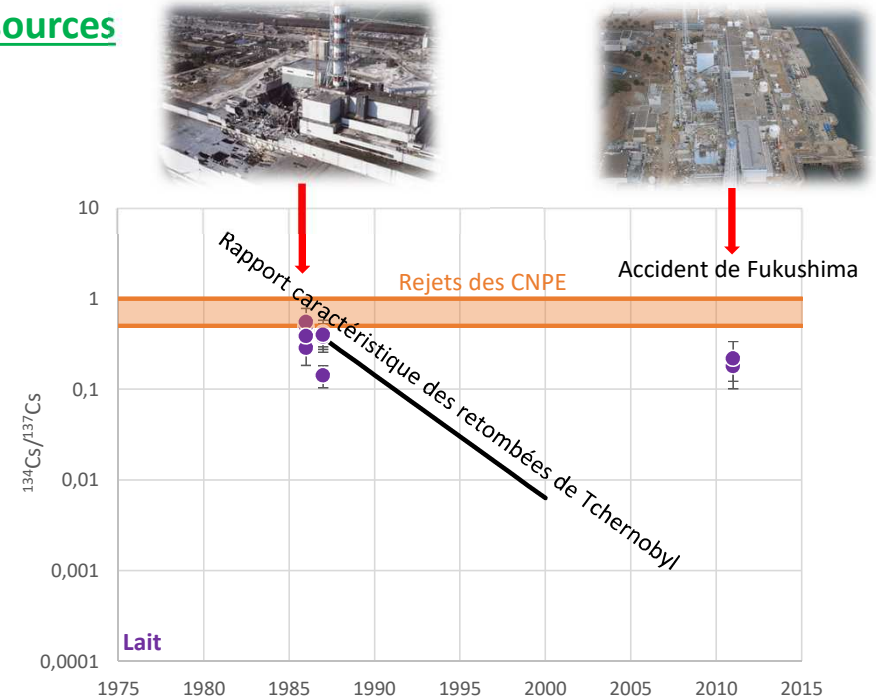
Exploitation du rapport d'activité $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ pour discriminer les sources

➤ Rapports $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ caractéristiques :

- des retombées de Tchernobyl : proche de 0,5 à l'émission en 1986 puis décroît au cours du temps selon la période radioactive du ^{134}Cs ;
- des retombées de Fukushima : proche de 1 à l'émission, observé fugacement en France;
- des rejets des CNPE : compris entre 0,5 et 1, rejet chronique.

Résultats dans le lait :

- Les résultats de mesure du ^{134}Cs dans les laits sont significatifs (>SD) uniquement au moment des retombées des accidents de Tchernobyl et de Fukushima ;
- Les rapports $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ mesurés sur les années 86-87 sont cohérents avec le rapport caractéristique des retombées de Tchernobyl.
- En 2011, le rapport $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ est inférieur au rapport caractéristique des retombées de Fukushima, en raison de la rémanence du ^{137}Cs en lien avec les retombées des tirs et de Tchernobyl.
- La contribution des rejets des CNPE ne peut être discriminée des autres sources.



Points de prélèvements tous sites et toutes distances confondues
15 valeurs significatives en ^{134}Cs sur la période / 530 mesures

Dans le compartiment terrestre

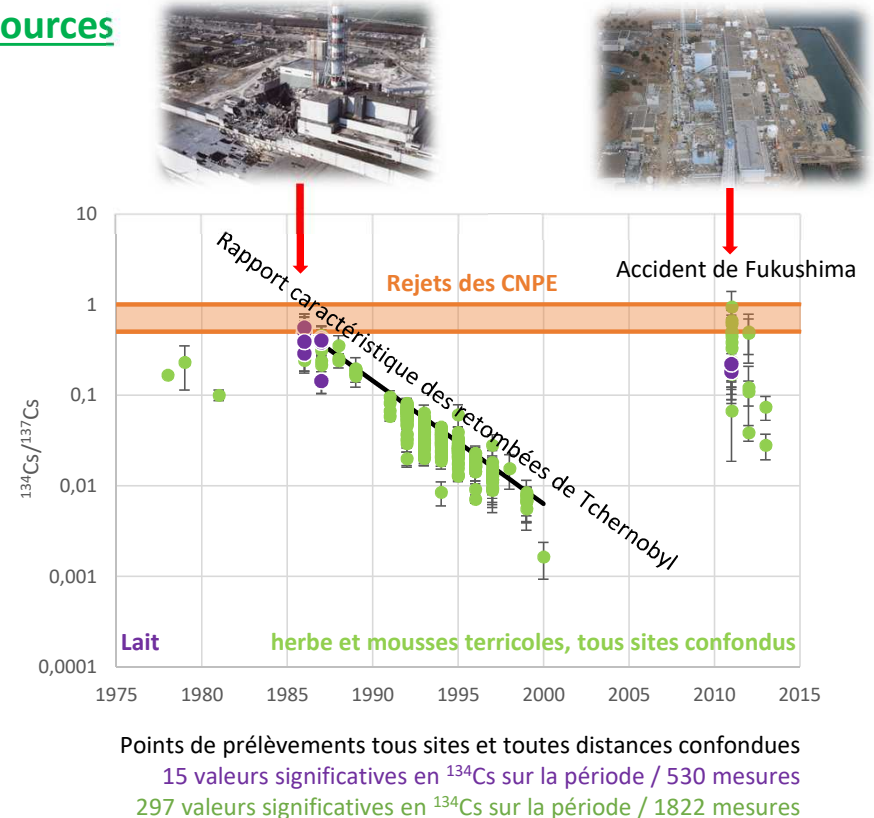
Exploitation du rapport d'activité $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ pour discriminer les sources

➤ Rapports $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ caractéristiques :

- des retombées de Tchernobyl : proche de 0,5 à l'émission en 1986 puis décroît au cours du temps selon la période radioactive du ^{134}Cs ;
- des retombées de Fukushima : proche de 1 à l'émission, observé fugacement en France;
- des rejets des CNPE : compris entre 0,5 et 1, rejet chronique.

Résultats dans les indicateurs végétaux (herbes et mousses) :

- Les résultats dans l'herbe et les mousses terricoles permettent de mettre en évidence plus durablement l'influence des contributions des retombées globales des accidents.
- Les rapports $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ mesurés dans les végétaux sur la période 1986-2000 sont proches en tendance longue du rapport caractéristique des retombées de Tchernobyl.
- L'exploitation des données sur les années suivant l'accident de Fukushima est plus difficile compte tenu du fait que les activités en ^{134}Cs ne sont plus significatives (càd $< \text{SD}$) après 2013.
- La contribution des rejets des CNPE ne peut être discriminée des autres sources.



Dans le compartiment terrestre

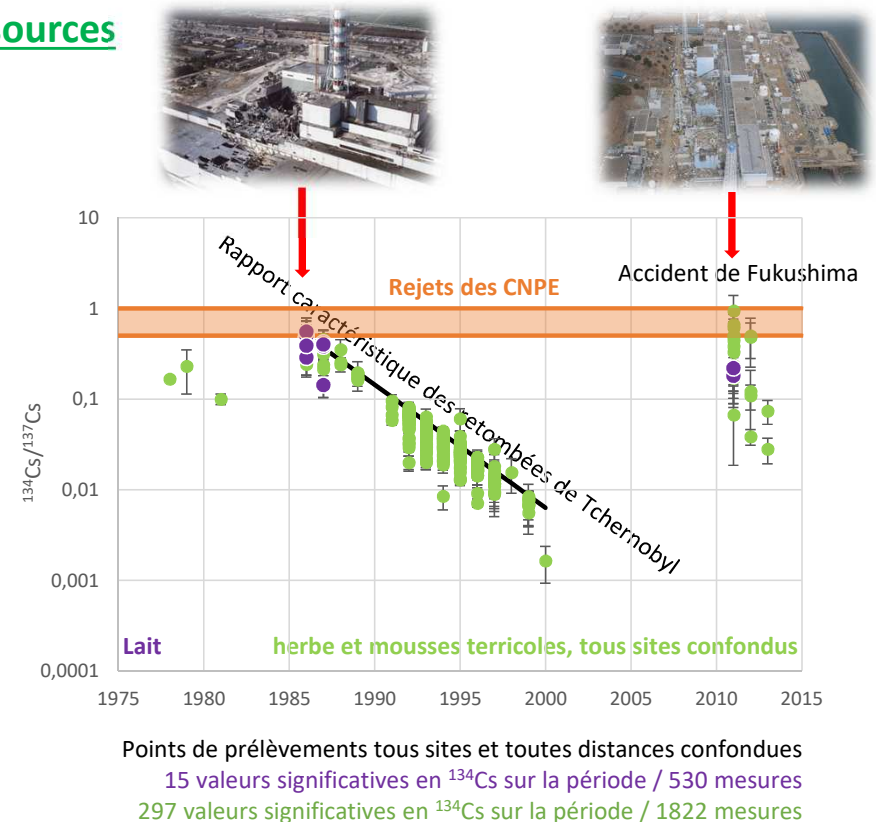
Exploitation du rapport d'activité $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ pour discriminer les sources

➤ Rapports $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ caractéristiques :

- des retombées de Tchernobyl : proche de 0,5 à l'émission en 1986 puis décroît au cours du temps selon la période radioactive du ^{134}Cs ;
- des retombées de Fukushima : proche de 1 à l'émission, observé fugacement en France;
- des rejets des CNPE : compris entre 0,5 et 1, rejet chronique.

Conclusion :

- L'analyse des résultats montre que le lait constitue un indicateur pertinent pour la caractérisation des retombées globales suite à des situations accidentelles.
- Néanmoins, dans la durée, les végétaux s'avèrent des indicateurs permettant de mettre en évidence plus durablement l'influence des contributions des retombées globales des accidents.



Dans le compartiment aquatique

Surveillance particulière du ^3H en milieu aquatique pendant un rejet

-> Etude particulière post-arrêtée réalisée à Saint-Alban en octobre 2018 :

- Prélèvements d'eau du Rhône réalisés avant le début du rejet, pendant le passage du panache de rejet, et le lendemain du rejet d'effluents radioactifs liquides, avec un débit instantané du Rhône inférieur à $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;
- Prélèvements de végétaux aquatiques également réalisés ;
- Prélèvements réalisés à l'amont et à l'aval du CNPE.
 - *Mesures HTO dans l'eau / Tritium de l'Eau de Déshydratation (TED) et Tritium Organiquement Lié (TOL) dans les végétaux*

Caractéristiques du rejet

- Rejet d'effluents radioactifs liquides (type KER) au Rhône après analyses, conformément à la réglementation, et après mélange avec les eaux de refroidissement à un taux de dilution minimal de 500 avant atteinte du milieu récepteur (Rhône) ;
- L'activité théorique attendue au Péage de Roussillon durant le rejet (plateau) est comprise entre 44 et $55 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$.

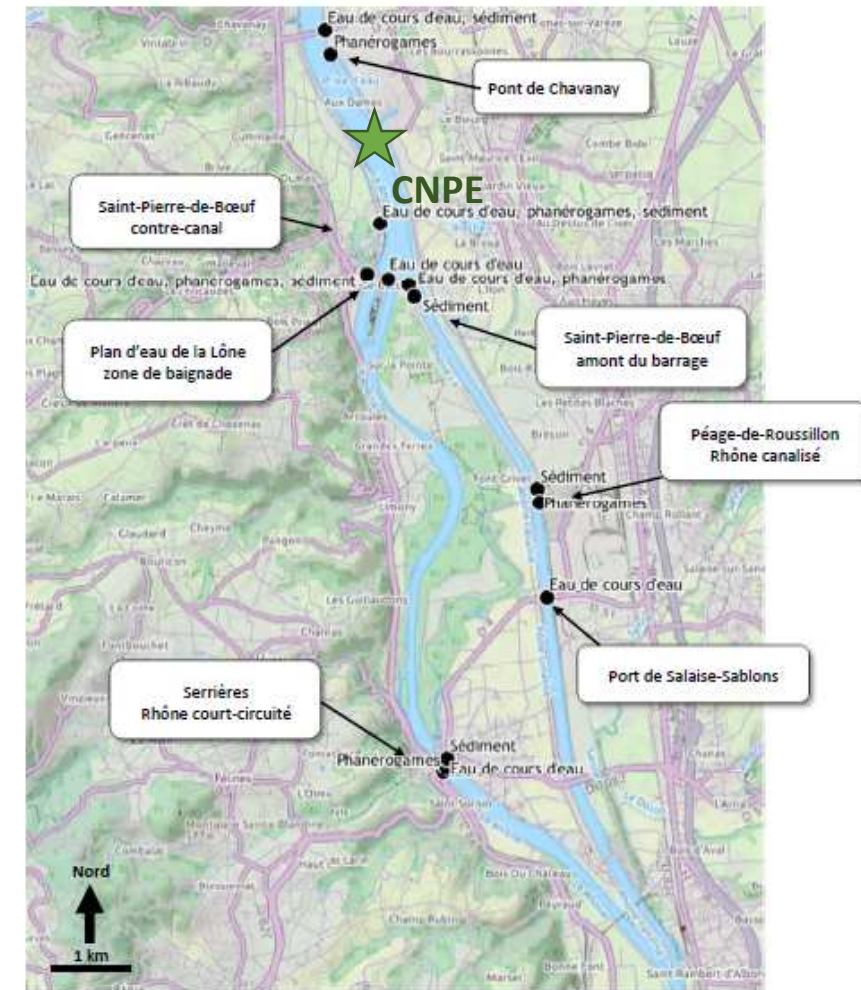
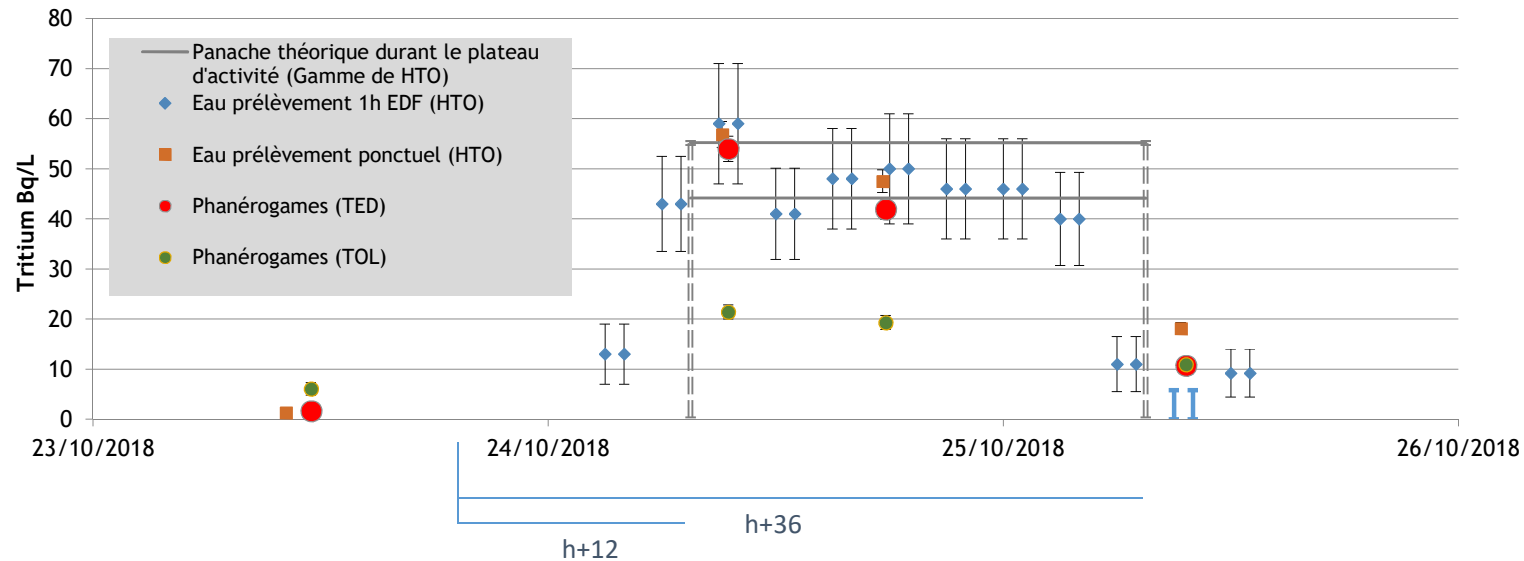


Figure 7. Localisation des matrices prélevées lors de l'étude RCC

Dans le compartiment aquatique

Surveillance particulière du ^3H en milieu aquatique pendant un rejet

➤ *Tritium dans l'eau du Rhône et dans les végétaux*



TED : Tritium de l'Eau de
Déshydratation
TOL : Tritium Organiquement Lié
TOLe : TOL échangeable

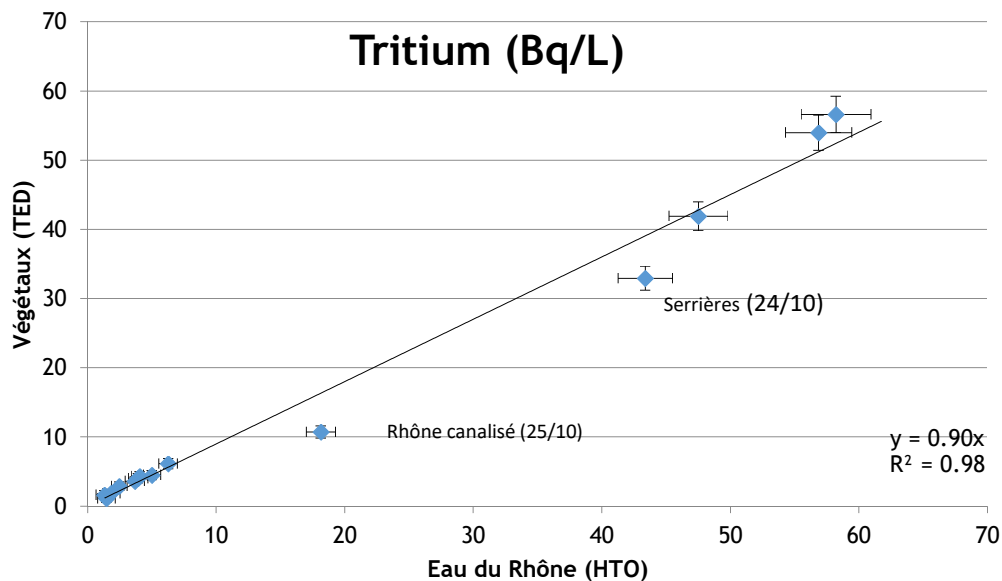
- Bonne corrélation entre HTO mesuré vs calculé dans l'eau => pertinence des outils de modélisation.
 - Augmentation de l'activité en HTO dans l'eau et de TED dans les plantes aquatiques au cours du rejet, puis diminution rapide jusqu'à retrouver la plage du bruit de fond après la fin du rejet.
 - Dans une moindre mesure, augmentation du TOL dans les plantes aquatiques pendant la période de rejet. Activité TOL doublée par rapport à l'activité avant le début du rejet => Mise en évidence de la part du TOL échangeable.
- ⇒ **Confirmation, par des mesures de terrain, de résultats habituellement observés en laboratoire : Equilibre rapide entre HTO dans l'eau et TED dans les plantes et mise en évidence de la fraction échangeable du TOL dans les plantes.**
- ⇒ **Intérêt pour la SRE :**
- **L'activité en TED dans les végétaux est cohérente avec l'activité en HTO dans l'eau (équilibre atteint en quelques heures)**
 - **L'activité du TOL peut également varier en fonction de la concomitance ou non du prélèvement avec un rejet, du fait de la part de TOL-e**

Dans le compartiment aquatique

Surveillance particulière du ^3H en milieu aquatique pendant un rejet



➤ Tritium dans l'eau du Rhône et dans les végétaux



Les activités volumiques en ^3H dans l'eau de déshydratation des végétaux (TED) mesurées lors de l'étude sont comprises entre $1,1 \pm 0,6$ et $56,6 \pm 2,6 \text{ Bq.L}^{-1}$.

Comme attendu, elles se mettent rapidement à l'équilibre avec celles des eaux du Rhône (HTO) collectées sur un même lieu et un moment proche.

Leurs activités volumiques présentent une très forte corrélation ($R^2 = 0,98$), malgré les changements d'activités volumiques en ^3H dans l'eau du Rhône en 2 à 3 heures.

Conclusions

- EDF réalise une SRE depuis la mise en service de ses installations nucléaires, cadrée par des dispositions réglementaires/modalités spécifiques à chaque installation.
- En complément, une surveillance radioécologique, réalisée par EDF depuis plusieurs décennies, a permis d'établir un REX de la pertinence et des critères de choix des bioindicateurs à utiliser.
- Les conclusions sont principalement d'ordre qualitatif, mais néanmoins précieuses pour l'établissement d'une stratégie de SRE cohérentes entre « objectifs » et « mesures à réaliser » (*=> renforcement de l'intérêt des mesures RN spécifiques vs indicateurs globaux*).

➤ Pour le compartiment terrestre :

- ✓ **Lait** : bon indicateur des retombées atmosphériques globales, mais moins pertinent que les végétaux pour la surveillance locale d'un CNPE en fonctionnement normal, compte tenu de la localisation des exploitations agricoles et des modes et origines d'alimentation du bétail. Les analyses réalisées à proximité des sites répondent néanmoins à d'autres enjeux (*évaluation dosimétrique, communication*).
- ✓ **L'intérêt de rapprocher les points de prélèvement de végétaux des installations est clairement établi.**
- ✓ **¹⁴C végétaux** : le prélèvement de feuilles de lierre offre une alternative pertinente à l'herbe.

➤ Pour le compartiment aquatique dulçaquicole :

- ✓ **Végétaux aquatiques** :
 - L'activité en TED dans les végétaux est cohérente avec l'activité en HTO dans l'eau (*équilibre atteint en quelques heures*)
 - L'activité du TOL peut varier en fonction de la concomitance ou non du prélèvement avec un rejet, du fait de la part de TOL-e

⇒ **Les données de REX issus de la SRE (*y.c radioécologiques*) sont des données sur lesquelles il convient de s'appuyer pour améliorer la stratégie de surveillance de l'environnement, et aller vers une utilisation rationnelle de la mesure et des ressources analytiques disponibles.**

Merci de votre attention



Introduction ⁽³⁾

Objectifs assignés à la SRE ([lien](#)).

