

3.1

Mesures in situ & exposition externe

A. Gurtner, S. Estier

Section Radioactivité de l'environnement, URA, Office fédéral de la santé publique OFSP, Berne

Résumé

En 2023, les campagnes de mesures de spectrométrie gamma in situ ont principalement ciblé les environs des centrales nucléaires et des centres de recherche tels que le PSI et le CERN. De plus, elles ont visé à surveiller la contamination résiduelle en ^{137}Cs issue des essais nucléaires atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl. Bien que cette contamination demeure plus prononcée au Tessin et dans le nord-est de la Suisse par rapport au Plateau suisse, les résultats pour l'année 2023 n'ont relevé aucune valeur présentant un risque pour la santé du public.

Introduction

En Suisse, la surveillance en continu de l'exposition ambiante s'appuie sur les réseaux NADAM à l'échelle nationale et MADUK au voisinage des installations nucléaires. Ces réseaux automatiques ont pour objectif de détecter, 24 heures sur 24, toute augmentation anormale de l'exposition ambiante. Toutefois, ces réseaux, tout comme les dosimètres à thermoluminescence enregistrent l'exposition ambiante globale sans pouvoir différencier ses composantes individuelles.

Les analyses d'échantillon en laboratoire par spectrométrie gamma visent quant à elles principalement la détection de traces de radionucléides. Ces résultats sont très ponctuels et ne fournissent pas d'informations sur l'exposition ambiante.

Pour pallier cette lacune, les laboratoires mobiles de l'OFSP (Section URA, Berne), de l'IFSN (Brugg), du Laboratoire de Spiez et de l'IRA (Lausanne) ont recours à la spectrométrie gamma directe sur site (in situ). Cette méthode présente l'avantage de permettre l'identification des radionucléides émetteurs gamma présents sur le site, d'estimer leurs activités et de calculer leur contribution individuelle à l'exposition du public. La spectrométrie gamma in situ fournit ainsi des informations sensibles et réalistes sur les concentrations moyennes des radionucléides gamma ainsi que sur l'exposition ambiante qui en résulte.

Méthodologie in situ

L'exploitation de la spectrométrie gamma in situ en Suisse se base largement sur les recommandations ICRU¹, notamment pour la détermination de l'activité des radionucléides présents sur le site.

Lors d'une mesure sur le terrain, un spectre gamma est enregistré et le débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ global est mesuré simultanément sur le site à l'aide d'une chambre d'ionisation. L'analyse du spectre gamma in situ permet tout d'abord d'identifier les différents radio-nucléides naturels et artificiels présents sur le site puis, en se référant à la publication ICRU 53, de calculer leur concentration radioactive respective dans le sol en [Bq/kg] ou [Bq/m²], si leur distribution dans le sol est connue (déposition en surface, distribution homogène des radionucléides dans le sol, décroissance exponentielle, etc.).

L'étape suivante consiste à évaluer les contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant des divers radionucléides identifiés sur le spectre in situ à partir de leur concentration radioactive calculée précédemment. Les facteurs de conversion de l'activité spécifique au débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ utilisés par notre laboratoire pour les séries naturelles de ^{238}U et

¹ ICRU-Report 53 «Gamma-Ray Spectrometry in the Environment» 1994, ISBN 0-913394-52-1.

du ^{232}Th ainsi que pour le ^{40}K et le ^{137}Cs , dans le cas d'une distribution homogène de ces radionucléides dans le sol, sont résumés dans le tableau 1^{2,3}.

Tableau 1:

Facteurs de conversion de l'activité spécifique en débit d'équivalent de dose ambiant $\text{H}^*(10)$ utilisés par l'OFSP pour les séries naturelles de ^{238}U et du ^{232}Th ainsi que pour le ^{40}K et le ^{137}Cs , dans le cas d'une distribution homogène de ces radionucléides dans le sol^{2,3}.

| Nucléide | [nSv·h ⁻¹ /Bq·kg ⁻¹] |
|---------------------------------|---|
| Série ^{238}U (total) | 0.564 |
| Série ^{232}Th (total) | 0.749 |
| ^{40}K | 0.0512 |
| ^{137}Cs | 0.192 |

La contribution d'origine naturelle au débit d'équivalent de dose ambiant $\text{H}^*(10)$ s'obtient par sommation des composantes locales du rayonnement terrestre (^{40}K , séries ^{238}U et ^{232}Th), évaluées pour une distribution homogène de ces radionucléides dans le sol, avec la contribution du rayonnement cosmique calculée à l'altitude du site. La formule suivante permet de calculer la contribution du rayonnement cosmique au débit d'équivalent de dose ambiant $\text{H}^*(10)$:

$$\text{H}^*(10)_{\text{cosm}} [\text{nSv/h}] = 37 \cdot \exp(0.38 \cdot Z)$$

où Z est l'altitude en km.

Pour connaître la contribution des radionucléides artificiels au débit d'équivalent de dose ambiant $\text{H}^*(10)$, deux approches sont possibles. La première consiste à soustraire la contribution d'origine naturelle, calculée précédemment, à la valeur globale de $\text{H}^*(10)$ mesurée avec une chambre d'ionisation. Cette démarche ne fournira que la contribution artificielle globale au débit d'équivalent de dose ambiant, mais possède l'avantage de ne nécessiter ni échantillonnage, ni hypothèse sur la distribution des radionucléides artificiels dans le sol.

Si par contre, la distribution dans le sol de chacun des radionucléides artificiels présents sur le site est connue, on choisira plutôt de calculer leur contribution respective à l'exposition à partir de leur concentration dans le sol. La somme des contributions naturelles et artificielles calculées à partir des spectres in situ est alors comparée à la valeur globale mesurée avec la chambre d'ionisation, afin d'évaluer la fiabilité de la méthode de reconstitution.

2 Lemercier et al., «Specific Activity to $\text{H}^*(10)$ conversion coefficients for in situ gamma spectrometry», Radiation Protection Dosimetry (2008), Vol 128, No. 1, pp.83-89. Advance Access publication 17 October 2007.

3 <https://www.bag.admin.ch/dam/bag/fr/dokumente/str/kommision-strahlenschutz/stellungnahmen-dosimetrie/2010-empfehlung-umrechnungsfaktoren-gammaspektrometrie.pdf.download.pdf/2010-empfehlung-umrechnungsfaktoren-gammaspektrometrie.pdf>

Sites examinés en 2023

Conformément au programme de surveillance habituel, en 2023, les campagnes de mesures de spectrométrie gamma in situ ont été menées aux abords des centrales nucléaires de Beznau (CNB), Gösgen (CNG), Leibstadt (CNL), et Mühlberg (CNM), ainsi que des centres de recherche (PSI, CERN) et du site d'entreposage temporaire de déchets radioactifs (ZWILAG) ainsi qu'au Tessin, région de Suisse la plus affectée par les retombées de l'accident de Tchernobyl.

Par ailleurs, les trois sites de référence (Posieux/FR, Güttingen/TG et Cadenazzo/TI) pour la surveillance de la radioactivité environnementale en Suisse ont été examinés en 2023. Les sites additionnels d'Arenenberg/TG, Coglio/TI, San Bernadino/GR et le col du Nufenen complètent la liste des emplacements visités au cours de cette année.

Résultats 2023

Les contributions respectives au débit d'équivalent de dose ambiant $\text{H}^*(10)$ des différents radionucléides identifiés par spectrométrie gamma in situ (descendants compris pour les séries naturelles) sont représentées sur les figures 1 à 4 pour les sites suisses examinés en 2023. Ces contributions ont été calculées à partir des spectres gamma in situ, en supposant une distribution homogène de tous les radionucléides dans le sol, y compris pour le ^{137}Cs artificiel. Afin d'apprécier la fiabilité de la reconstitution, la valeur ainsi que l'incertitude de la mesure globale avec chambre d'ionisation sont également représentées.

En 2023, le ^{137}Cs a été le seul émetteur gamma d'origine artificielle mis en évidence sur l'ensemble des sites. Du ^{60}Co a été détectés à la clôture de la centrale nucléaire en démantèlement de Mühlberg et de l' ^{41}Ar dans l'air sur deux sites du CERN.

Les résultats des mesures réalisées à proximité des centrales nucléaires, du PSI et du ZWILAG (voir fig. 1) sont comparables à ceux enregistrés sur les sites de référence, tels que Güttingen ou Posieux, situés hors de l'influence de ces installations.



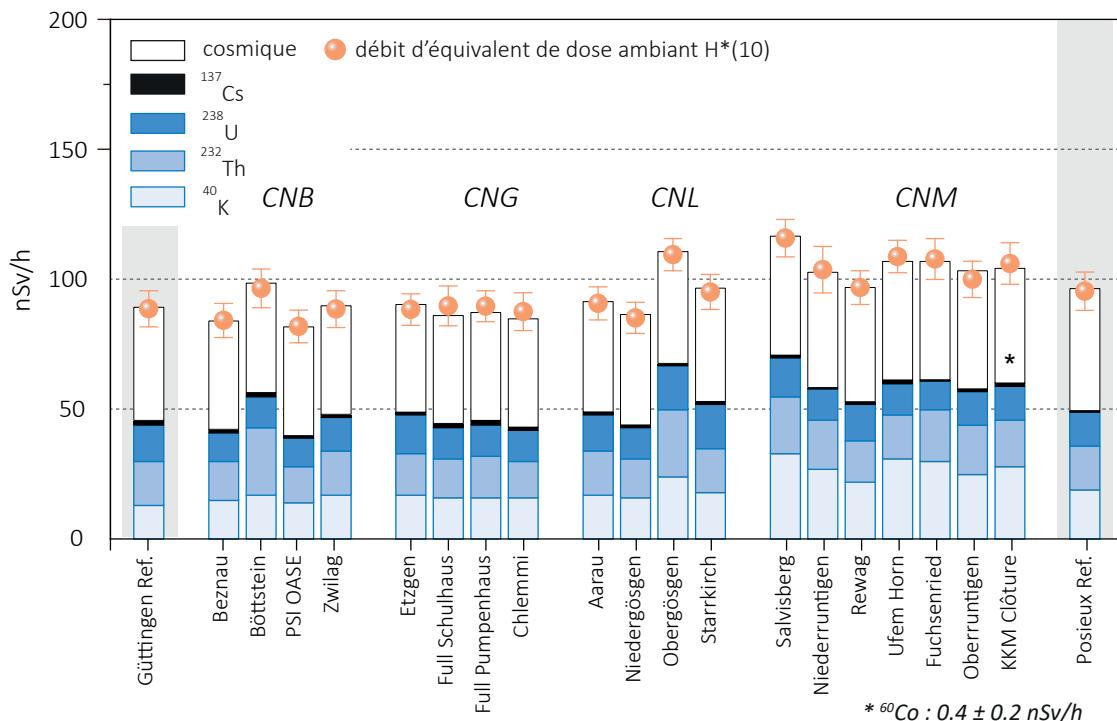


Figure 1:

Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ calculées à partir des spectres *in situ* (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés au voisinage des centrales nucléaires suisses en 2023 ainsi qu'aux points de référence de Göttingen/TG et Posieux/FR (en grisé). La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ avec chambre d'ionisation est également représentée.

Pour la centrale nucléaire de Mühleberg (suivi 2017-2023, figure 2), mise hors service en septembre 2020, les mesures *in situ* ont été réalisées en 2023 sur les sept sites examinés dans le cadre du programme complémentaires «Point zéro Démantèlement KKM 2017-2019» dont le rapport [Démantèlement de la centrale nucléaire de Mühleberg: Mesures Point Zéro 2017-2019](#)⁴ de l'IFSN et l'OFSP, est consultable sur le site internet de l'OFSP.

En sus des quatre sites examinés au cours de la période d'exploitation, ce programme comprend l'analyse de trois points supplémentaires (Fuchsried, Oberrutigen et Clôture), situés à proximité immédiate de la centrale. En effet, contrairement à un rejet éventuel par voie atmosphérique tel qu'il pourrait se produire en période d'exploitation, l'éventuel impact des travaux de désaffectation devrait être localisé dans un périmètre plus restreint.

En 2023 du ⁶⁰Co a été détecté au point de mesure situé à proximité de la clôture de la centrale nucléaire de Mühleberg (CNM). La mesure en laboratoire de l'échantillon de sol prélevé simultanément, n'a révélé aucune trace de ⁶⁰Co (< 0.6 Bq/kg). Le ⁶⁰Co visible sur le spectre *in situ* provenait très certainement, tout comme en 2021, de matériaux du démantèlement entreposés temporairement sur le site de la centrale.

⁴ https://www.bag.admin.ch/dam/bag/fr/documents/str/ura/AutresRapports/KKM_NUL-LPEGELMESSUNG_2017_2019.pdf.download.pdf/KKM_NULLPEGELMESSUNG_2017_2019.pdf

Les valeurs de débit de dose enregistrées lors des mesures *in situ* au voisinage de la CNM en 2023 étaient toutefois conformes à la normale, contrairement à 2021, où la présence de matériaux issus des travaux de démantèlement stockés temporairement sur le site avait conduit à une valeur plus élevée à la clôture (voir figure 2).

Pour l'année 2023, on constate sur la figure 2 que les valeurs de ⁴⁰K sont à nouveau dans la norme contrairement à celles mesurées en 2022 généralement plus élevées que celles enregistrées au cours des années précédentes. La grande sécheresse de l'été 2022 était à l'origine des valeurs plus élevées. En effet, en l'absence d'humidité dans le sol, sa densité est plus faible que la valeur standard utilisée pour calculer la réponse du détecteur (étalonnage en efficacité). Aucune correction de l'auto-absorption pour tenir compte de la variation de la densité n'étant appliquée, les valeurs d'activité sont surestimées si la densité du sol est plus faible que la valeur de référence, ou sous-estimée si la densité est plus élevée (voir chapitre 3.1. du rapport annuel 2022).

La figure 3 montre les résultats des mesures *in situ* réalisées au voisinage du CERN en 2023. Ces résultats ne se distinguent généralement pas de ceux enregistrés sur le site de référence de Posieux, mis à part les traces d'⁴¹Ar dans l'air décelées aux points de mesure Chouilly et BAT588.



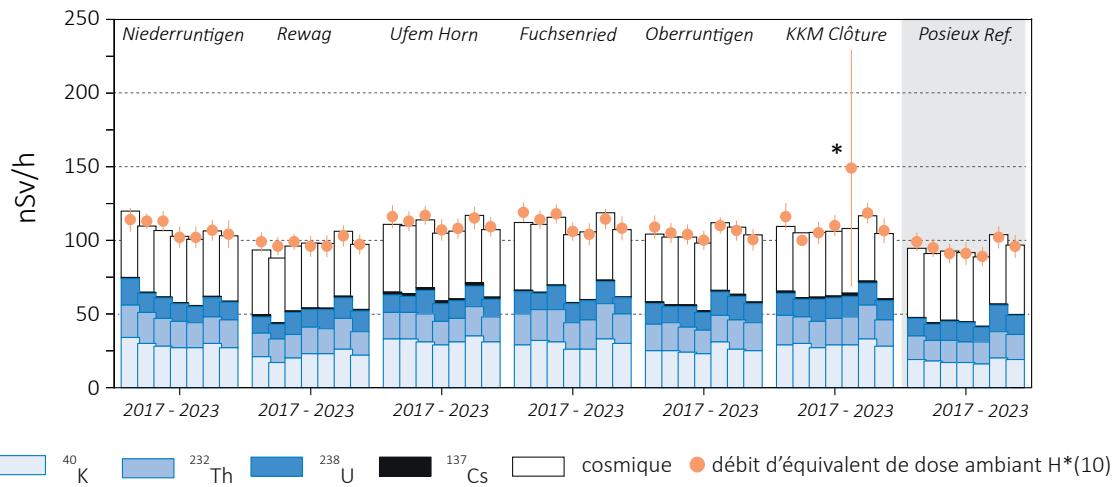


Figure 2:

Figure 2: Suivi 2017-2023 des contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ calculées à partir des spectres in situ (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés au voisinage de la centrale nucléaire de Mühleberg ainsi qu'au point de référence de Posieux/FR (en gris). La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ avec chambre d'ionisation est également représentée. * La valeur plus élevée de débit de dose mesurée à la clôture de KKM en 2021 est due à la présence de matériaux issus des travaux de démantèlement, stockés temporairement sur le site.

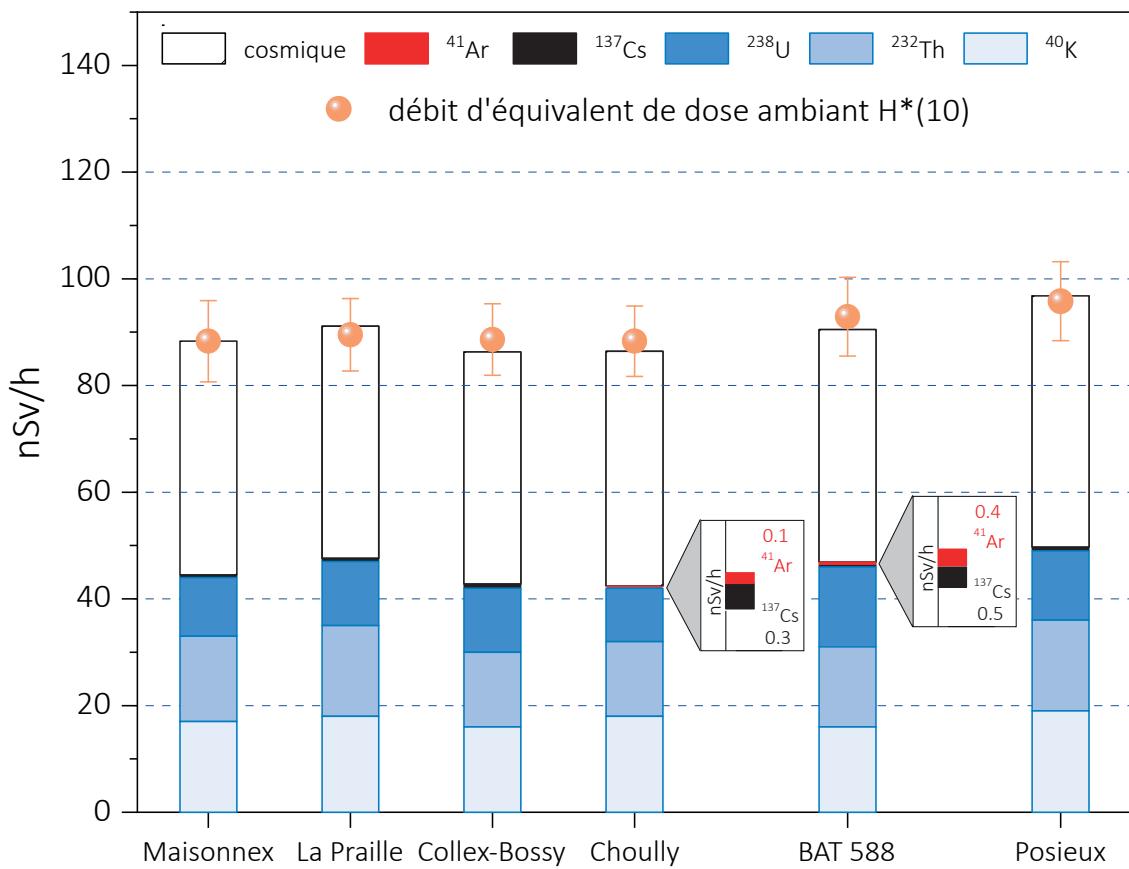


Figure 3 :

Figure 3: Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ calculées à partir des spectres in situ (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés en 2023 au voisinage du CERN. La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ avec chambre d'ionisation est également représentée.

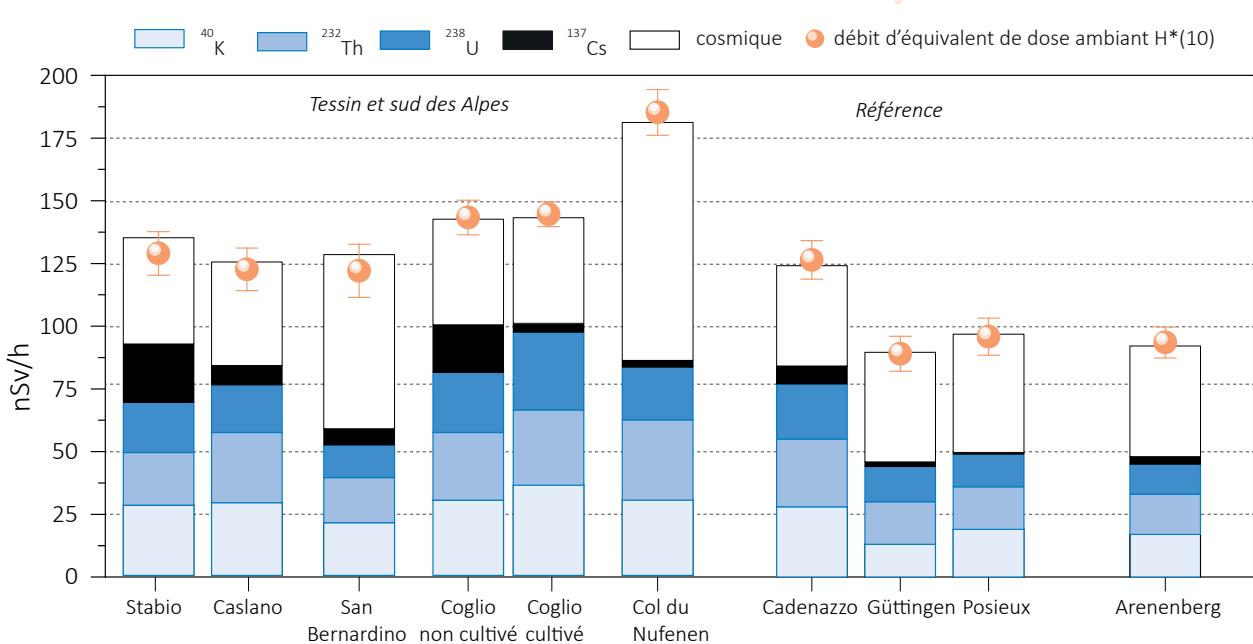


Figure 4:

Contributions individuelles au débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ calculées à partir des spectres *in situ* (distribution supposée homogène des radionucléides dans le sol) mesurés en 2023 au sud des Alpes, à Arenenberg / TG ainsi que sur les 3 sites de référence. La mesure globale du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ avec chambre d'ionisation est également représentée.

Au Tessin, comme le montre la figure 4, la contamination rémanente en ^{137}Cs , issue des retombées des essais nucléaires des années 50 et 60 et surtout de celles de l'accident de Tchernobyl (1986), est toujours clairement visible.

Les concentrations de ce radionucléide dans le sol présentent des variations significatives d'un emplacement à un autre à travers le canton, rendant difficile l'établissement d'une valeur de référence pour la contamination du sol en ^{137}Cs . Ces disparités s'expliquent d'une part par les écarts dans les dépôts initiaux, directement liés aux quantités de précipitations au moment du passage du nuage radioactif post-Tchernobyl, et en fonction de l'altitude pour les retombées des essais atomiques des années 50 et 60. D'autre part, ces variations sont également influencées par les différences de nature et de traitement des sols depuis 1986, tels que les travaux effectués, le retournement des sols ou non, etc.

Un cas particulier illustre bien ce phénomène de disparité. Sur le site de Coglio (figure 5) dans le val Maggia, deux mesures *in situ* ont été réalisées à moins de 25 m de distance. L'une sur un sol régulièrement cultivé et l'autre sur un sol non cultivé très probablement depuis l'accident de Tchernobyl. Les prélèvements de terre (carottes de 0-5 cm de profondeur, d'un diamètre de 6 cm, réparties sur un rectangle de 2 m², lyophilisées, tamisées 0.2 mm) indiquent, comme le montre le tableau 2, des rapports d'activité d'un facteur 12 pour le ^{137}Cs , et d'un facteur 11 pour le ^{90}Sr entre les deux emplacements. Pour les mesures in

situ, le facteur est de 6. La zone non cultivée étant très petite, la «vision» d'environ 300 m² du spectromètre gamma *in situ* englobe également des zones non cultivées, ce qui moyenne l'activité du sol.

Tableau 2:

Comparaison des activités en Bq/kg (matière sèche) du ^{137}Cs et du ^{90}Sr sur le site de Coglio/TI pour un sol cultivé et un sol non cultivé en 2023 (mesures URA et IRA).

| Type de sol | ^{137}Cs [Bq/kg] <i>in situ</i> | ^{137}Cs [Bq/kg] prélèvement | ^{90}Sr [Bq/kg] prélèvement |
|-------------|--|---------------------------------------|--------------------------------------|
| cultivé | 18.0 ± 2.6 | 18.5 ± 1.0 | 0.32 ± 0.09 |
| non cultivé | 99.0 ± 10 | 224 ± 10.6 | 3.56 ± 0.70 |

Ce site très contrasté a également été inondé suite à des crues de la rivière Maggia, ce qui a déposé des sédiments et déplacé une partie de la couche supérieure du sol vers la route cantonale. D'où la grande diversité dans la répartition de la contamination. Cet exemple illustre parfaitement, que sans connaissance de l'historique du site examiné, il est très difficile de donner une valeur unique pour de tels terrains et à fortiori pour de plus grandes surfaces.

Dans la région du Nord-Est de la Suisse, notamment à Güttingen et Arenenberg, les retombées de ^{137}Cs résultant de l'accident de Tchernobyl ont été plus prononcées que sur le reste du plateau suisse, bien que demeurant nettement moins élevées que dans la zone située au sud des Alpes.



Figure 5:

Site de mesure de Coglio dans le val Maggia au Tessin. Vue aérienne et emplacement des mesures in situ et des prélèvements de sols.

Il convient de souligner que, pour tous les sites examinés, les écarts entre la reconstruction in situ et les mesures par chambre d'ionisation sont demeurés en dessous de 10%, corroborant ainsi la fiabilité de la méthode.

Conclusions

Les mesures de spectrométrie gamma in situ réalisées par l'OFSP en 2023 ont permis de caractériser les sites d'intérêt du point de vue de leur composition en radionucléides émetteurs gamma et des contributions individuelles au débit d'exposition qui en résultent pour le public. Le champ d'application de ces mesures a visé à répondre à des objectifs d'ordre réglementaire (voisinage des installations nucléaires suisses) et d'ordre radioécologique (suivi des contaminations ^{137}Cs des retombées des essais nucléaires et de Tchernobyl).

De manière générale, cette méthode a permis de distinguer les composantes naturelles et artificielles de la radioactivité gamma et de s'assurer de la pertinence de l'information acquise par comparaison du débit d'équivalent de dose ambiant $H^*(10)$ calculé à partir de l'analyse spectrométrique à celui mesuré avec une chambre d'ionisation.

Au niveau national, même si les concentrations plus élevées de ^{137}Cs dues aux retombées de Tchernobyl sont toujours plus importantes au Tessin et localement dans les régions montagneuses par rapport au plateau Suisse, les résultats, en termes d'exposition du public, n'ont mis en évidence aucune valeur susceptible de représenter un risque pour la santé de la population.