



Cristina Poretti, Adrian Hess, Gerald Scharding

13 juin 2025

Campagne de mesures aéroradiométriques 2025

du 26 mai au 6 juin 2025

Rapport d'exercice et résultats des mesures



Table des matières

1	Condensé	3
2	Exercice d'aéroradiométrie 2025	4
2.1	Objectifs généraux de l'équipe d'aéroradiométrie	4
2.2	Vols de mesure aux alentours des centrales nucléaires suisses	4
2.3	Campagne internationale de mesures avec des équipes d'Allemagne, de France, de Lituanie et de Tchéquie, du 2 au 6 juin 2025	4
2.4	Information de la population, des médias et des autorités.....	6
2.5	Rapport scientifique	6
2.6	Organisations partenaires participantes.....	6
3	Programme de mesures standard : centrales nucléaires de Mühleberg et de Gösgen.....	8
3.1	Programme de mesures standard : centrale nucléaire de Mühleberg	8
3.2	Programme de mesures standard : centrale nucléaire de Gösgen.....	11
4	Campagne de mesures internationale	14
4.1	Mission 1 : mesures de référence au-dessus de la place d'armes de Thouné	14
4.2	Mission 2 : mesures du rayonnement de fond.....	16
4.3	Mission 3 : établissement d'une carte commune (« composite mapping »).....	17
4.4	Mission 4 : recherche de sources	22
4.5	Mission 5 : vol de mesures mixte	26
5	Bilan	33
	Annexe A : Généralités.....	35

1 Condensé

Comme pour l'année précédente, on s'est écarté pour la campagne annuelle de mesures aéroradiométriques 2025 de la procédure habituelle. Au lieu du programme d'une semaine comprenant des mesures standard autour des installations nucléaires suisses, la cartographie radiologique des zones habitées et quelques vols permettant d'acquérir des connaissances et de l'entraînement, la campagne s'est tenue sur une semaine et demie.

C'était au tour des centrales de Mühleberg et de Gösgen de faire l'objet de mesures, et les programmes standard s'y sont déroulés les mardi 27 et mercredi 28 mai. Du 2 au 6 juin 2025, la Suisse a en outre accueilli un exercice international de mesures aéroradiométriques. Cet événement a vu la participation des deux équipes de mesure suisses, à savoir celle de la Centrale nationale d'alarme (CENAL) et celle du Centre de compétences NBC-DEMUNEX, ainsi que d'équipes de mesure par hélicoptère venues d'Allemagne, de France, de Lituanie et de Tchéquie. Pour la première fois, une recherche de sources a été effectuée d'abord par hélicoptère, puis avec cinq drones. Enfin, deux observateurs suédois ont procédé à plusieurs mesures au sol, y compris dans les zones déjà survolées par les équipes hélicoptérées.

Principaux résultats de l'exercice d'aéroradiométrie 2025

1. L'exercice international a permis de travailler la collaboration avec des équipes étrangères. Contrairement à l'année précédente, l'attribution des mandats et la coordination des vols ont été effectuées par les responsables des équipes suisses.
2. L'établissement d'une carte composite (« composite mapping ») a encore une fois été exercé. Une large zone a été divisée en secteurs, répartis entre les différentes équipes. Les mesures obtenues ont ensuite été réunies sur une seule et même carte. Cinq systèmes, qu'il a fallu coordonner, étaient à l'œuvre, et une première carte commune a pu être dressée le lendemain.
3. La campagne comprenait également une recherche de sources sur la place d'armes de Frauenfeld. Le but était de situer de manière approximative plusieurs sources de radioactivité dans un temps imparti. Sur les instructions des opérateurs, les pilotes ont ensuite pu survoler plusieurs fois et dans différentes directions les sources détectées, ce qui a permis une identification et une localisation plus précises des radionucléides.
4. Les équipes de mesure qui ont participé à l'exercice ont grandement tiré profit des échanges. Elles ont pu approfondir leurs relations avec les équipes d'intervention de leurs partenaires internationaux et améliorer leur connaissance de leur doctrine d'intervention, de leurs capacités, de leur analyse des données et de leur équipement.
5. En collaboration avec l'Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN), il a été possible de procéder aux mesures de contrôle aux environs de la centrale nucléaire de Gösgen et de celle de Mühleberg, en cours de démantèlement. Aucune augmentation de la radioactivité n'a été constatée par rapport au sous-sol naturel en dehors des sites des centrales, et aucun changement n'a été observé par rapport aux résultats des années précédentes.
6. Les spécialistes des mesures de la radioactivité, les techniciens et les pilotes de l'équipe d'aéroradiométrie disposent d'un excellent niveau de formation et d'entraînement.

2 Exercice d'aéroradiométrie 2025

Les vols de mesure de cette année ont eu lieu en Suisse entre le 26 mai et le 6 juin. Pendant la première semaine, il a été procédé dans le cadre du programme standard de mesures à des vols au-dessus des environs de la centrale de Gösgen et de la centrale désaffectée de Mühleberg ainsi qu'à des mesures aéroradiométriques.

La deuxième semaine a été consacrée à une campagne internationale de mesures à laquelle ont participé des équipes ARM venues d'Allemagne, de France, de Tchéquie et, pour la première fois, de Lituanie. Cette dernière bénéficiait du soutien d'une délégation américaine. Le mercredi après-midi, des équipes de ces mêmes pays ont accompli avec des drones une mission de recherche de sources sur la place d'armes de Frauenfeld.

2.1 Objectifs généraux de l'équipe d'aéroradiométrie

La semaine de mesure poursuivait les objectifs fondamentaux suivants :

- installation et disponibilité opérationnelle de l'équipement de mesure dans les délais impartis ;
- mise en pratique des connaissances requises pour un engagement :
 - préparation d'un engagement
 - utilisation des appareils pendant l'engagement
 - évaluation et interprétation des résultats pendant et après le vol
 - entraînement des pilotes aux vols aéroradiométriques ;
- mise en pratique de la communication entre les pilotes et l'équipe de mesure (p. ex. guidage du vol par l'opérateur) ;
- présentation des résultats des mesures : mise à disposition d'un condensé et d'une interprétation des résultats dans les deux heures suivant le vol ;
- perfectionnement et renforcement des connaissances pour l'exploitation du système ARM de la CENAL ;
- vérification et mise à jour de la documentation d'intervention ;
- échange avec les équipes et les spécialistes des partenaires internationaux.

2.2 Vols de mesure aux alentours des centrales nucléaires suisses

Les centrales nucléaires suisses font l'objet de mesures aéroradiométriques bisannuelles sur mandat de l'IFSN. Cette année, les vols de mesure ont été effectués au-dessus des centrales de Gösgen et de Mühleberg.

2.3 Campagne internationale de mesures avec des équipes d'Allemagne, de France, de Lituanie et de Tchéquie, du 2 au 6 juin 2025

Une année après l'exercice international organisé en Tchéquie et huit ans après celui qui s'était tenu en Suisse, une campagne de mesures impliquant des équipes hélicoptères et des équipes de pilotes de drones venues d'Allemagne, de France, de Lituanie, de Tchéquie et de Suisse a eu lieu sur le territoire helvétique du lundi 2 au vendredi 6 juin. Les membres d'une délégation venue des États-Unis ont apporté leur soutien à l'équipe lituanienne et assisté aux opérations en tant qu'observateurs indépendants, tandis qu'une équipe suédoise était présente avec des instruments de mesure au sol. Les objectifs généraux de la semaine étaient les suivants :

- mise en pratique des connaissances requises pour un engagement ;

- échange d'expériences entre partenaires internationaux concernant la doctrine d'intervention, les capacités opérationnelles et techniques, l'analyse des données et l'équipement utilisé ;
- entraînement aux interventions aéroradiométriques internationales, en particulier
 - coordination des vols de mesure dans une zone commune
 - recherche commune de sources
 - échange et harmonisation de données entre équipes ;
- comparaison des systèmes de mesure et des processus des différentes délégations.

2.3.1 Étendue du programme de l'exercice international

Mission 1 : mesures de référence

Les participants ont eu l'occasion, lors d'un vol au-dessus de la place d'armes de Thoune, de mesurer un secteur à la topographie simple et avec une distribution des radionucléides normale et typique pour la Suisse. Cette région ayant déjà fait l'objet de nombreuses mesures au sol, les caractéristiques radiologiques de son sol est bien connues.

Mission 2 : mesures du rayonnement de fond

En procédant à des vols de mesure au-dessus de plans d'eau importants, il est possible de déterminer le rayonnement qui n'est pas d'origine terrestre. En effet, comme l'eau arrête en grande partie le rayonnement terrestre, les mesures ainsi effectuées permettent de quantifier les autres rayonnements, à savoir le rayonnement cosmique et le rayonnement émis par les instruments de mesure (rayonnement de fond de l'hélicoptère), et de calculer les facteurs de correction nécessaires à l'obtention des valeurs nettes. Le lac de Thoune a été retenu pour cet exercice en raison de sa proximité avec le secteur de la mission 1.

Mission 3 : établissement d'une carte commune (« composite mapping »)

Lors de l'établissement d'une carte commune, un secteur est réparti entre plusieurs équipes. Il peut ainsi être mesuré plus rapidement que si un seul hélicoptère devait se charger de l'intégralité de la surface. La difficulté est de définir des sections en tenant compte au mieux de la durée maximale de vol et de la vitesse de mesure des équipes participantes. Il faut en outre ensuite réunir les données obtenues. Cette mission devait se dérouler sur une zone étendue du Plateau suisse, où il était également prévu d'effectuer la détection de sources radioactives préparées et surveillées. En raison de très mauvaises conditions météorologiques le jour de l'exercice, le périmètre a dû être réduit de manière significative.

Mission 4 : recherche de sources

Une recherche de sources s'est déroulée sur un terrain d'exercices militaires à Frauenfeld (TG). Le matin, ce sont les équipes héliportées qui étaient à l'œuvre, tandis que l'après-midi était réservé aux équipes manœuvrant des drones.

Mission 5 : vol de mesures mixte

Les mesures effectuées tous les deux ans dans les environs des centrales nucléaires de Leibstadt et de Beznau, du PSI et de Zwiilag ont permis d'identifier une zone située au nord-ouest du PSI où la concentration en thorium 232 (^{232}Th) naturel est supérieure à la moyenne suisse. Pour que les équipes puissent mesurer cette anomalie naturelle ainsi que d'autres effets dus à l'exploitation des installations du PSI, comme l'annihilation électron-positron, un secteur A a été défini aux alentours de l'institut. Dans le secteur B, une source de sélénium 75 (^{75}Se) avait été disposée sur le site de l'accélérateur linéaire SwissFEL. Les hélicoptères

devaient voler au-dessus du SwissFEL en suivant une ligne donnée, réagir en fonction des résultats obtenus et densifier les mesures pertinentes.

Le PSI procédera ultérieurement à une étude détaillée des résultats de la campagne de mesures, avec analyse et comparaison scientifiques. En outre, des enseignements doivent pouvoir être tirés sur la compatibilité des systèmes de mesures et des données.

2.4 Information de la population, des médias et des autorités

2.4.1 Vols de mesure

En raison des nuisances sonores émises par les hélicoptères de radiométrie, il a été jugé indispensable d'informer largement le public au préalable. Les autorités des communes survolées et les polices cantonales concernées ont toutes été averties par écrit des vols prévus et invitées à renvoyer vers la CENAL en cas de questions de la population.

Le 20 mai, les vols de mesure ont été annoncés dans un communiqué de presse. Les partenaires et les autorités avaient déjà été avisés.

Pendant la semaine de mesure, des informations ont été diffusées quotidiennement sur les canaux [Alertswiss](#) de l'OFPP et sur les réseaux sociaux. Le plan de vol a en outre été publié sur le site Internet de la CENAL.

Plusieurs demandes des autorités, des médias et de la population ont été traitées avant et pendant la semaine de mesure.

Le 5 juin, un communiqué de presse a présenté un premier bilan de la semaine.

2.4.2 Exercice international

Le 2 juin, les représentants des médias ont été invités à une conférence de presse lors de laquelle les organes concernés ont donné des informations sur la collaboration en vol des cinq équipes et sur les vols aéroradiométriques. Ils ont ensuite pu rencontrer et interviewer les équipes de mesure à l'aérodrome. Le choix explicite d'une stratégie d'information offensive s'explique par le faible nombre de grandes régions inhabitées en Suisse et l'impossibilité d'éviter les émissions de bruit et leur perception par la population.

2.5 Rapport scientifique

Le PSI publiera vraisemblablement d'ici à la fin de l'année un rapport scientifique détaillé.

2.6 Organisations partenaires participantes

Les organisations suivantes ont été impliquées dans la préparation et la réalisation du programme de mesures standard autour des installations nucléaires suisses de Gösgen et Mühleberg ainsi que de l'exercice international :

- Centrale nationale d'alarme (CENAL) et EM CF CENAL
- Institut Paul Scherrer (PSI)
- Centre de compétences NBC-DEMUNEX
- Laboratoire de Spiez (LS)
- Forces aériennes suisses (FA)
- Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN)

- Équipe tchèque : Institut national de radioprotection (SÚRO)
- Équipe française : Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR)
- Équipe allemande : Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) et Bundespolizei-Flugdienst (BPOLFLD)
- Équipe lituanienne : Radiation Protection Centre (RSC) et State Border Guard Police (SBGS), avec le soutien de représentants du Nevada National Security Site (NNSS, USA)
- Équipe suédoise : Swedish Radiation Safety Authority
- Autorités de surveillance : Office fédéral de la santé publique (OFSP) et Suva
- Armée : places d'armes de Frauenfeld, Liestal, Brugg, Dagmersellen, Thoune et centre logistique de l'armée d'Othmarsingen
- Association suisse pour la technique du soudage (ASS)
- SAR-Transports SA
- Office fédéral de la douane et de la sécurité des frontières (OFDF)
- Office fédéral de l'aviation civile (OFAC)
- Polices cantonales et coordinateurs NBC des cantons AG, BE, BL, LU, TG, SO

La CENAL et l'équipe d'aéroradiométrie remercient tous les participants pour leur collaboration aussi fructueuse qu'amicale.



3 Programme de mesures standard : centrales nucléaires de Mühleberg et de Gösgen

Cette année, c'était au tour des centrales nucléaires de Mühleberg et Gösgen d'être l'objet des mesures aéroradiométriques.

La centrale de Mühleberg a été définitivement arrêtée en décembre 2019 et a cessé son fonctionnement de puissance. Néanmoins, comme son démantèlement n'est pas encore terminé, que le site et ses environs restent sous surveillance et que les zones de protection sont maintenues en l'état, le programme de mesures standard y a été effectué.

En révision pendant la campagne de mesures 2025, la centrale nucléaire de Gösgen était à l'arrêt.

3.1 Programme de mesures standard : centrale nucléaire de Mühleberg

3.1.1 Centrale nucléaire de Mühleberg : informations sur le vol

Date et heure :	27.5.2025, 14 h – 16 h 10	Durée du vol : 2 h 10 min
Lignes de vol :	28 lignes, espacement de 250 m	Zone survolée : env. 75 km ²
Hauteur :	env. 90 m	

3.1.2 Centrale nucléaire de Mühleberg : débit de dose ambiant

À l'extérieur de l'aire d'exploitation de la centrale nucléaire de Mühleberg

La carte du débit de dose ambiant (DDA) représentée à la Figure 1 ne montre aucun élément remarquable en dehors de l'aire d'exploitation de la centrale. Les variations observées dans la zone survolée sont dues à la géologie, à la topographie, aux cours d'eau et à la végétation.

On distingue clairement le lac de Wohlen, dont les valeurs sont plus basses en raison de l'atténuation du rayonnement terrestre par l'eau.

Aucune différence significative n'a été constatée par rapport aux mesures effectuées dans les environs de la centrale les années précédentes.

À l'intérieur du site

On distingue aisément la centrale nucléaire sur la carte. Le site affiche un DDA élevé, qui s'explique par la présence de cobalt 60 (⁶⁰Co) dans le matériel entreposé de manière sécurisée sur l'aire d'exploitation avant traitement ultérieur. Ce produit d'activation a été identifié par les appareils de mesure. La dose ambiante sur le site est surveillée en continu. Les valeurs limites légales sont respectées.

La surface indiquée en rouge sur la carte semble plus grande que l'aire d'exploitation de la centrale. Cela est dû à la résolution spatiale limitée des données et au fait que la sensibilité du détecteur ne se limite pas au rayonnement incident perpendiculaire, mais s'étend à un volume conique (voir encadré en page 13). Les valeurs élevées ont d'ailleurs uniquement été mesurées sur la ligne passant directement au-dessus du site, comme le montre la carte recensant les points de mesure effectifs du DDA (figure 2).

Comme une partie du site de la centrale nucléaire se situait déjà dans ce volume conique quand l'hélicoptère était à 100 m à l'ouest de la centrale, des valeurs plus hautes ont été obtenues dès cet endroit, et ce, même si le matériel contaminé par le ⁶⁰Co était entreposé à l'intérieur du périmètre du site.

Standardmessprogramm KKM

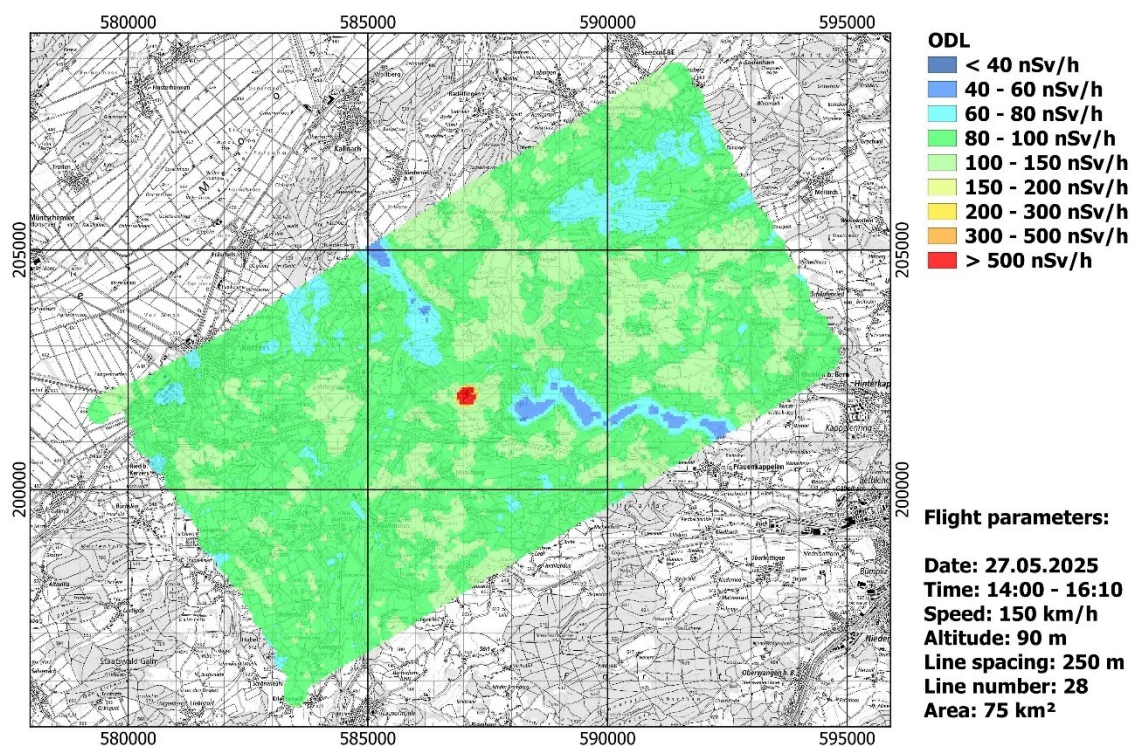


Figure 1 : Carte du DDA aux alentours de la centrale nucléaire de Mühleberg, en cours de démantèlement

Standardmessprogramm KKM

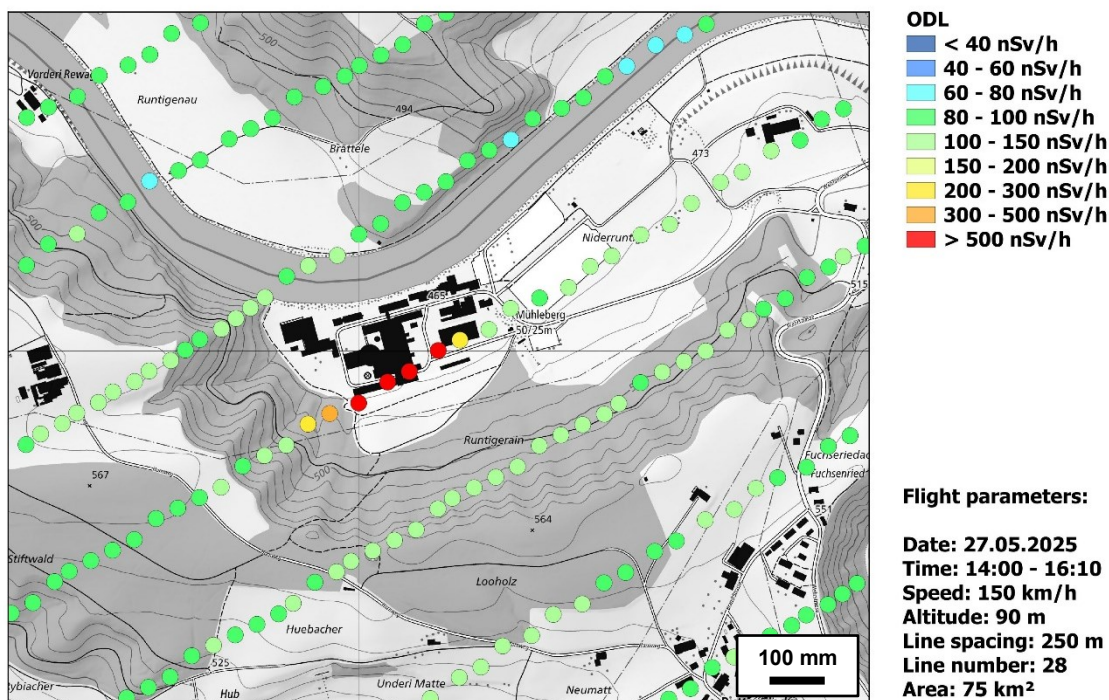


Figure 2 : Carte des points de mesures du DDA sur la ligne survolant la centrale nucléaire de Mühleberg et les lignes voisines

3.1.3 Centrale nucléaire de Mühleberg : rapport MMGC

La carte de la figure 3 représente le rapport entre les deux extrémités du spectre d'énergie. Les radionucléides artificiels produisant en général uniquement des rayonnements gamma de faible énergie, ce rapport qu'on appelle « Man-made Gross Count » (MMGC) correspond à peu près à celui entre le rayonnement artificiel et le rayonnement naturel. Sur le site de la centrale de Mühleberg, il est élevé en raison du matériel entreposé contenant du cobalt 60 (^{60}Co).

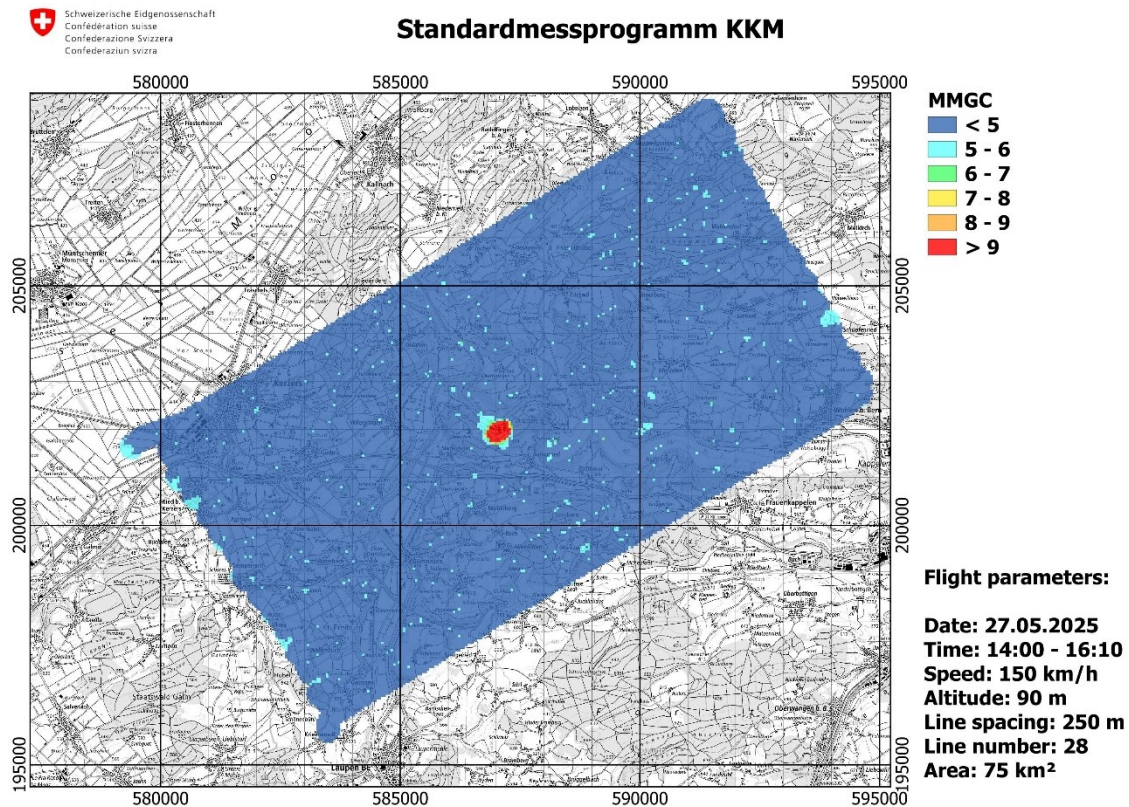


Figure 3 : Carte du rapport MMGC aux environs de la centrale nucléaire de Mühleberg

En dehors de l'aire d'exploitation de la centrale, aucune valeur élevée n'a été détectée. Le fait que la zone marquée en rouge dépasse le périmètre du site de la centrale tient à l'interpolation des valeurs mesurées lors de l'établissement de la carte.

3.1.4 Centrale nucléaire de Mühleberg : ^{60}Co

Le spectre gamma de la figure 4 a été mesuré lors des vols au-dessus de la centrale nucléaire de Mühleberg. On distingue nettement les pics énergétiques typiques du ^{60}Co à 1173 keV et 1333 keV, qui confirment que les valeurs de DDA et le rapport MMGC élevés sont dus à la présence de ce radionucléide.

Les cartes établies pour d'autres nucléides ne faisant ressortir aucun élément remarquable, elles ne sont pas incluses dans le présent rapport.

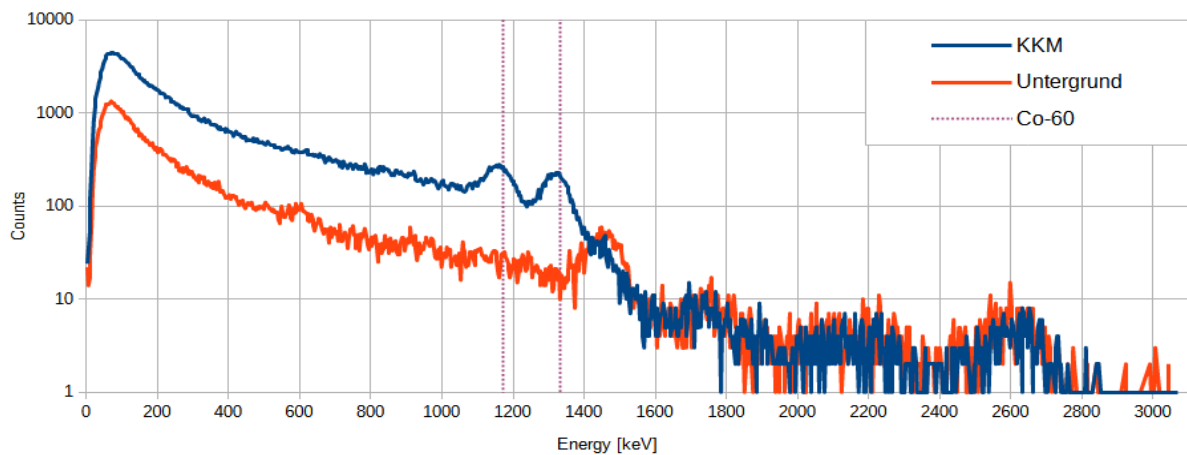


Figure 4 : Spectre gamma, moyenne à partir de quelques points de mesure présentant des valeurs élevées du DDA près de la centrale nucléaire de Mühleberg. On distingue nettement les pics énergétiques typiques du ^{60}Co à 1173 et 1333 keV.

3.2 Programme de mesures standard : centrale nucléaire de Gösgen

3.2.1 Centrale nucléaire de Gösgen : informations sur le vol

Le programme de mesures standard pour la centrale nucléaire de Gösgen a été légèrement revu en 2023 afin de permettre une meilleure couverture des zones habitées. Lors de la campagne de mesures 2025, ce n'était donc que la deuxième fois que le périmètre était mesuré dans ces dimensions.

Date et heure : 28.5.2025, 8 h 13 – 10 h 26 Durée du vol : 2 h 13 min

Lignes de vol : 28 lignes, espacement de 250 m Zone survolée : env. 93 km²

Hauteur : env. 90 m

3.2.2 Centrale nucléaire de Gösgen : débit de dose ambiant

La carte du DDA (Figure 5) ne montre aucun élément remarquable à l'extérieur de l'aire d'exploitation de la centrale nucléaire de Gösgen. Les variations observées dans la zone survolée sont dues à la géologie, à la topographie, aux cours d'eau et à la végétation. Les valeurs mesurées directement au-dessus de l'Aar sont plus basses en raison de l'atténuation du rayonnement terrestre par l'eau.

Aucune différence significative n'a été constatée par rapport aux mesures effectuées dans les environs de la centrale les années précédentes.

3.2.3 Centrale nucléaire de Gösgen : 40K

Comme en 2023, la carte du potassium (^{40}K) de la Figure 6 fait apparaître des valeurs particulièrement basses dans la partie ouest du périmètre mesuré, entre Bad Lostorf et Hauenstein, un secteur majoritairement inhabité. La comparaison directe avec la carte du DDA de la figure 5 met en évidence la corrélation.

Les cartes établies pour d'autres nucléides ne faisant ressortir aucun élément remarquable, elles ne sont pas incluses dans le présent rapport.

Standardmessprogramm KKG

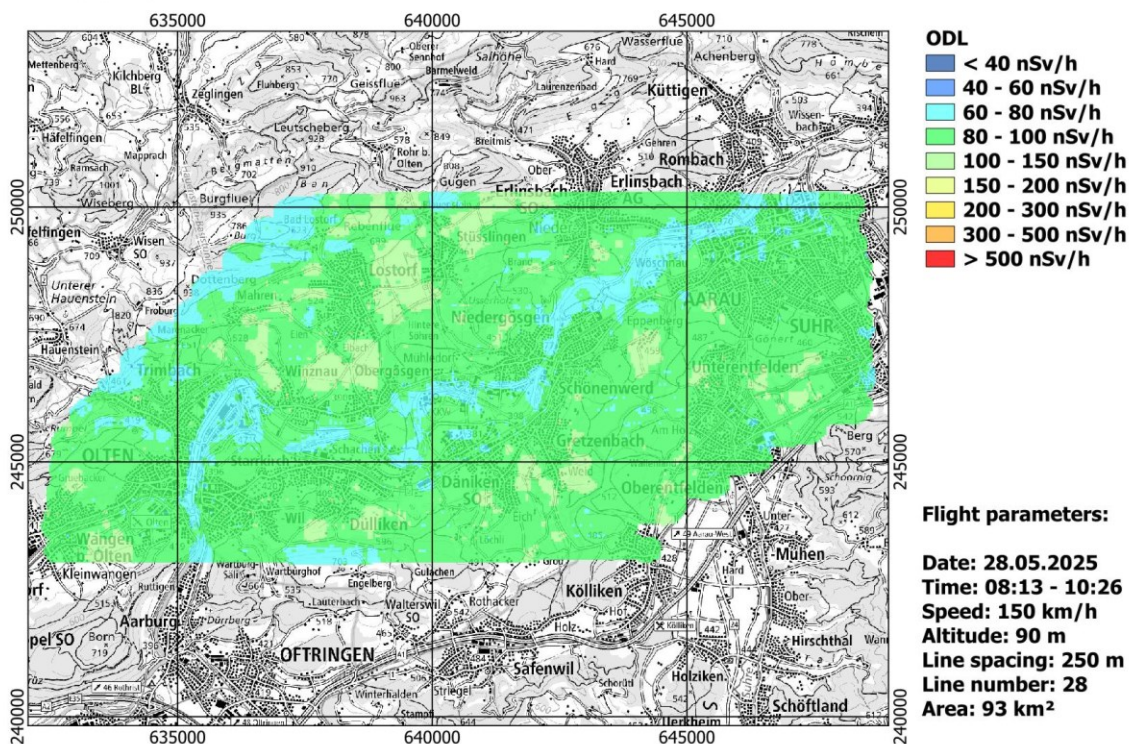


Figure 5 : Carte du DDA aux environs de la centrale nucléaire de Gösgen

Standardmessprogramm KKG

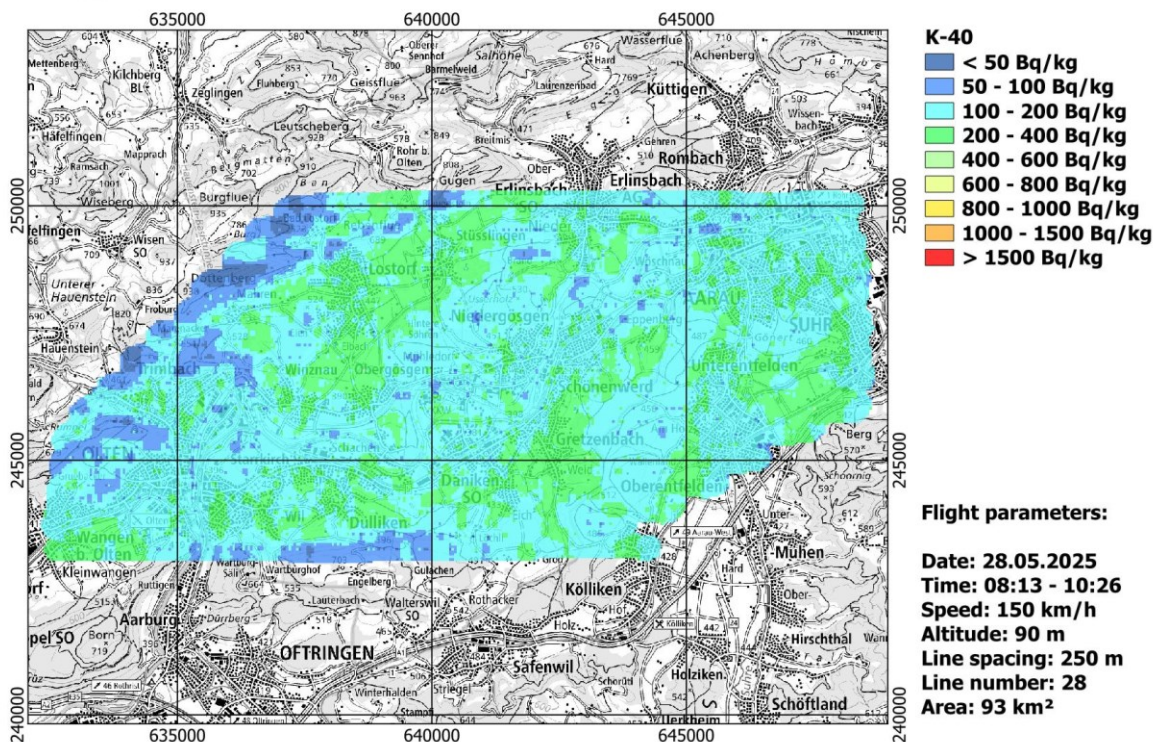


Figure 6 : Carte du ^{40}K aux alentours de la centrale nucléaire de Gösgen

Explication : sensibilité du détecteur

Les équipements de mesure réagissent aux rayons gamma qui frappent le détecteur par en dessous, y compris à ceux qui ne sont pas directement perpendiculaires à l'appareil. Par conséquent, les mesures incluent le rayonnement provenant d'un volume conique sous l'hélicoptère.

Si aucune source de rayonnement n'est disposée entre le sol et l'appareil sur une surface horizontale survolée à une hauteur de 90 m, la valeur mesurée correspond au rayonnement gamma d'un cercle d'un diamètre d'environ 250 m.

Lorsque plusieurs mesures sont prises le long d'une ligne de vol à un intervalle inférieur à 250 m, des valeurs élevées ne signifient pas forcément que la source de rayonnement se trouve directement au-dessous de l'hélicoptère.



4 Campagne de mesures internationale

Le présent chapitre traite uniquement des résultats de l'équipe suisse. Les résultats de toutes les équipes seront analysés dans le cadre du rapport scientifique détaillé publié par le PSI.

4.1 Mission 1 : mesures de référence au-dessus de la place d'armes de Thoune

4.1.1 Mission 1 – informations sur le vol (équipe CHE1)

Date et heure CHE1 : 5.6.2025, 8 h 32 – 8 h 45 Durée du vol : 13 min

Lignes de vol CHE1 : 7+2 lignes, espacement de 125 m Zone survolée : env. 1,6 km²

Hauteur : env. 90 m

Restriction imposée par la direction d'exercice : durée de vol maximale dans le périmètre mesuré : 15 min

Directives de la direction d'exercice : hauteur et lignes de vol (nombre et espacement) définies

4.1.2 Mission 1 – mesures de référence : DDA et rapport MMGC

Dans le cadre de la mission 1 Mesures de référence, sept lignes ont été mesurées au-dessus de la place d'armes de Thoune, puis la densité des données au centre du périmètre a été renforcée par l'ajout de deux lignes supplémentaires. La Figure 7 figure 7 montre la carte du DDA établie sur cette base. Les points gris, qui représentent chacun un point de mesure, indiquent les lignes de vol. Les valeurs de DDA mesurées sont faiblement dispersées et se situent toutes autour de 80 nSv/h. La carte du rapport MMGC de la Figure 8 figure 8 n'affiche que quelques points de mesure avec un rapport MMGC ≥ 5 ; leur distribution est régulière. Les cartes établies pour les radionucléides ⁴⁰K, ²³²Th et ²³⁸U (uranium 238) ne faisant ressortir aucun élément remarquable, elles ne sont pas incluses dans le présent rapport.

Mission 1: Reference Measurement

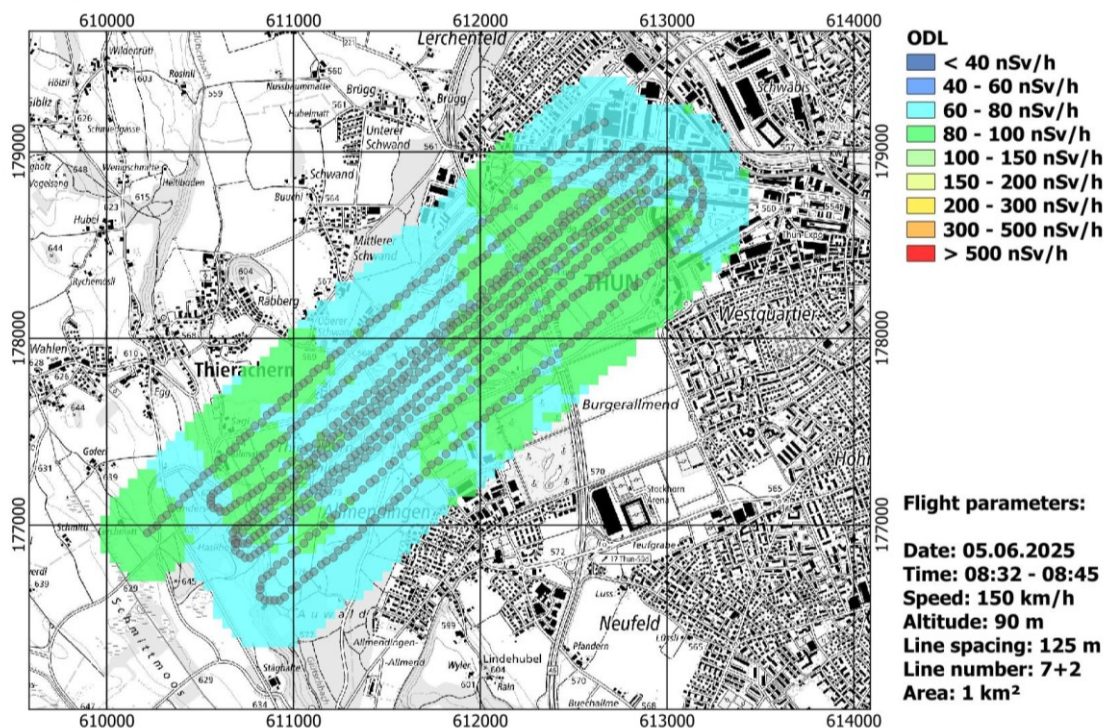


Figure 7 : Mission 1 : carte du DDA aux alentours du secteur de référence Place d'armes de Thoune. Les points de mesure apparaissent en gris, ce qui permet d'identifier les lignes de vol.

Mission 1: Reference Measurement

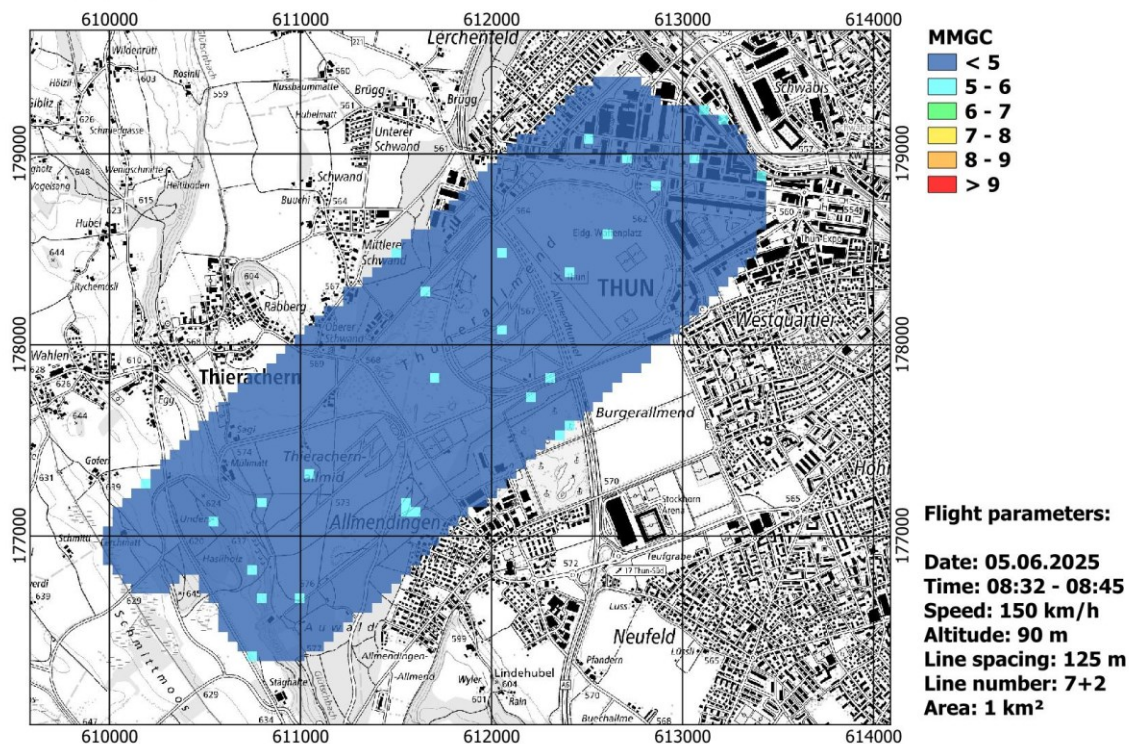


Figure 8 : Mission 1 : carte du rapport MMGC aux alentours du secteur de référence Place d'armes de Thoune

4.2 Mission 2 : mesures du rayonnement de fond

4.2.1 Mission 2 – informations sur le vol (équipe CHE1)

Date et heure CHE1 : 5.6.2025, 8 h 46 – 9 h 09 Durée du vol : 25 min

Lignes de vol CHE1 : 7 lignes, à différentes hauteurs

Hauteur : env. 90 – 2400 m

Directives de la direction de l'exercice : ligne de vol définie, hauteurs de vol indiquées avec deux priorités différentes, durée maximale des mesures de 30 min

4.2.2 Mission 2 – mesures du rayonnement de fond Lac de Thoue

Le lac de Thoue a été survolé à différentes altitudes (300 ft/90 m, 600 ft/180 m, 1000 ft/300 m, 2000 ft/600 m, 4000 ft/1200m, 6000 ft/1800 m, 7700 ft/2350 m) le long d'une ligne de vol. La hauteur maximale prévue était de 8000 ft/2440 m, mais il n'a pas été possible de procéder à des mesures à cette altitude en raison de la couverture nuageuse.

Le rayonnement de fond se compose essentiellement du rayonnement terrestre, du rayonnement cosmique et du rayonnement émis par les instruments de mesure (rayonnement de l'hélicoptère). Comme l'eau arrête le rayonnement terrestre, le survol d'une étendue d'eau permet de déterminer la somme du rayonnement cosmique et du rayonnement des appareils. On peut voir à la Figure 10 que les taux de comptage de l'ensemble du spectre d'énergie augmentent légèrement avec l'altitude, ce qui s'explique par la part croissante du rayonnement cosmique. L'annihilation électron-positron se dessine en outre plus nettement à 511 keV. Les deux effets sont la conséquence des interactions entre les particules cosmiques de haute énergie et la matière de l'atmosphère, des instruments de mesure et de l'hélicoptère.

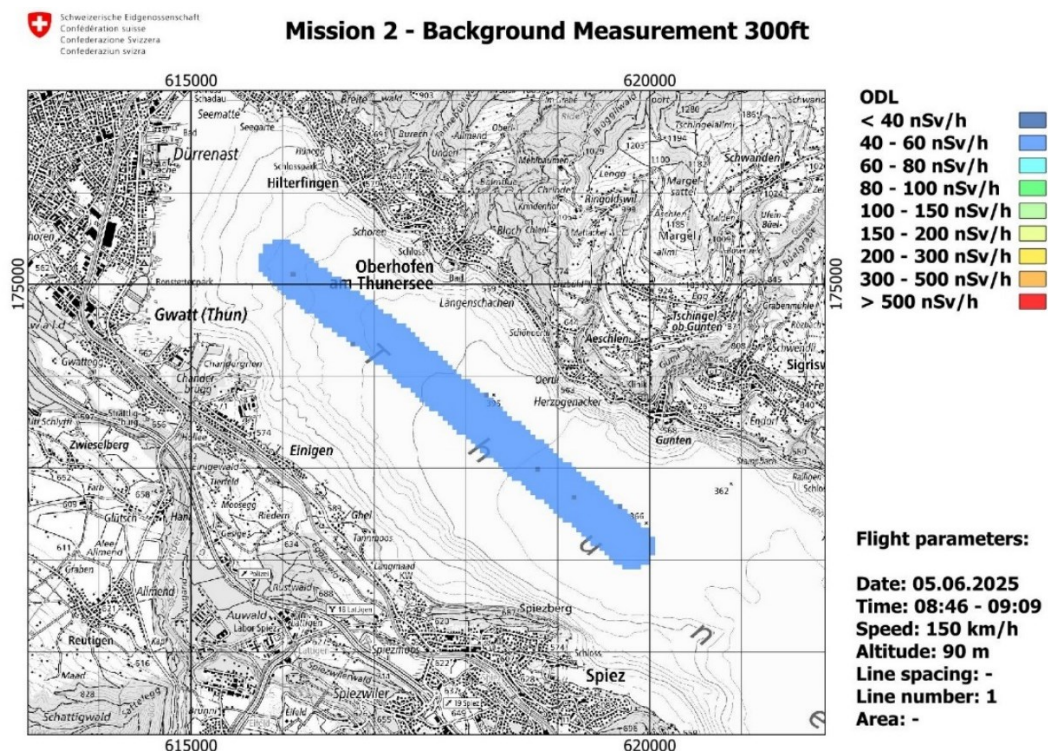


Figure 9 : Mission 2 : carte du DDA pour les mesures du rayonnement de fond au-dessus du lac de Thoue. Comme attendu, le DDA hors rayonnement terrestre est constant.

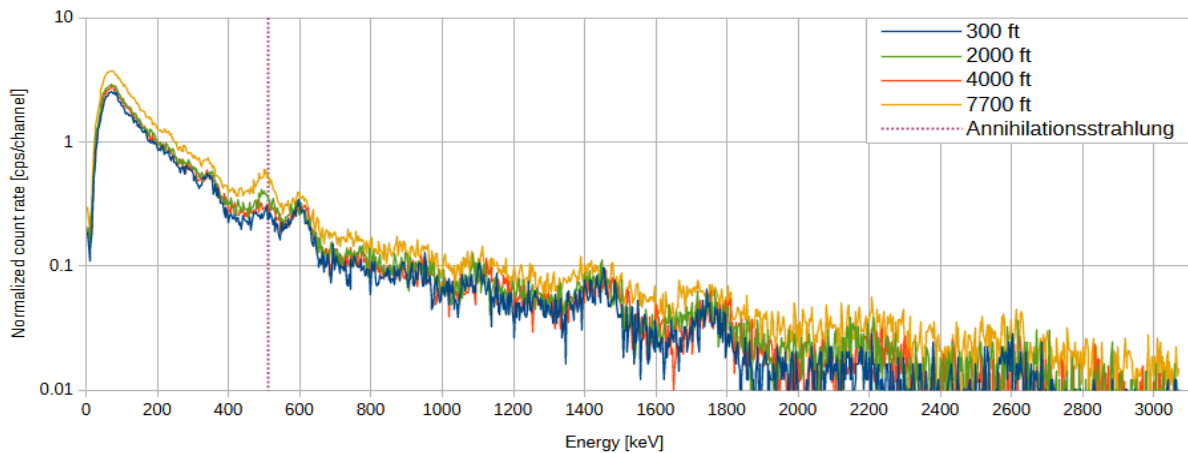


Figure 10 : Mission 2 : sommes des spectres obtenus lors des mesures de rayonnement de fond à 300 ft, 2000 ft, 4000 ft, et 7700 ft au-dessus du lac de Thoue

4.3 Mission 3 : établissement d'une carte commune (« composite mapping »)

Les modalités de l'établissement d'une carte commune ont été discutées et définies le lundi matin en présence de toutes les équipes et sous la direction de l'équipe suisse. La journée du mardi était prévue pour les vols de mesure. Toutes les équipes devaient mesurer en même temps le secteur qui leur était attribué, la surface totale faisant environ 2100 km². Le mardi matin, les conditions météorologiques étaient malheureusement trop mauvaises. Pour des raisons de sécurité, il n'a été possible de voler que quelques heures l'après-midi, et l'étendue de la mission a dû être fortement réduite. Un nouveau plan de vol a par conséquent été établi le mardi matin. Comme la faible radioactivité de la source était connue, les équipes se sont toutes vu imposer une hauteur de vol de 90 m et un espacement de 300 m. Les vitesses de vol ont présenté de légers écarts en fonction des paramètres standard des équipes, s'inscrivant entre 100 et 150 km/h.

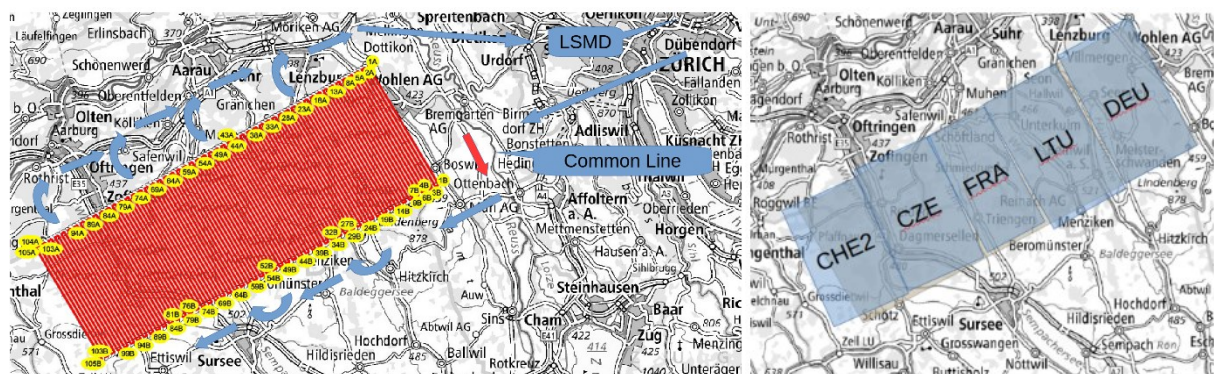


Figure 11 : Planification en vue de l'établissement d'une carte commune, mission qui s'est déroulée le mardi matin. Une ligne de vol commune (« common line », en rouge) a été définie pour tous les hélicoptères afin d'assurer la comparabilité des données et de faciliter le calibrage. En outre, des points d'entrée (au sud) et de sortie (au nord) ont été fixés pour garantir la meilleure coordination possible.

Deux sources avaient été disposées en dehors du périmètre de mesures réduit. Pour gagner le plus d'expérience possible, ces deux emplacements ont toutefois été attribués en tant que POI (« Points of Interest ») à l'équipe CHE1, qui a ainsi pu les survoler de manière ciblée et tenter d'identifier les sources.

L'après-midi, l'hélicoptère allemand n'a pas pu accomplir sa mission en raison d'un défaut technique. Le secteur attribué à l'équipe allemande (DEU) a par conséquent été confié à CHE1 pendant que celle-ci mesurait les deux POI. DEU a pu répéter le vol de mesures le lendemain, une fois le problème réglé. On dispose donc pour le secteur Est de données comparables des équipes CHE1 et DEU.

4.3.1 Mission 3 : informations concernant l'établissement d'une carte commune et l'exercice d'identification de sources avec emplacement connu

Caractérisation des sources avec emplacement connu

Date et heure CHE1 : 3.6.2025, 13 h 45 – 13 h 54 Durée du vol : 9 min
3.6.2025, 14 h 02 – 14 h 12 Durée du vol : 10 min

Emplacements survolés : Orismühle, env. 3 km au sud-ouest de Liestal
Place de tir, env. 2 km au sud-est de Zeihen

Hauteur : env. 90 m

VoIs de mesure dans le cadre de la mission 3 avec périmètre réduit

Date et heure CHE1 : 3.6.2025, 14 h 18 – 15 h 28 Durée du vol : 1 h 10 min
Date et heure CHE2 : 3.6.2025, 13 h 48 – 15 h 42 Durée du vol : 1 h 54 min

Lignes de vol CHE1 : 17 lignes, espacement de 300 m Zone survolée : env. 70 km²
Lignes de vol CHE2 : 25 lignes, espacement de 300 m Zone survolée : env. 90 km²
Sur le territoire des communes de Brittnau/Dagmersellen/Nebikon

Hauteur : env. 90 m

Restrictions imposées par la direction d'exercice : deux réservoirs pleins par équipe (matin et après-midi), plein effectué uniquement pendant la pause de midi à LSMD, décollage autorisé seulement à partir de 9 h

Remarque de la direction d'exercice : la radioactivité la plus faible est d'env. 350 MBq ¹³⁷Cs.

4.3.2 Mission 3 – identification des sources (équipe CHE1) : DDA et rapport MMGC

Il n'a pas été prévu de lignes de vol pour les mesures. Les pilotes ont reçu les informations importantes au moment approprié pendant le vol. Six petites sources de césium 137 (¹³⁷Cs) d'une radioactivité totale de 400 MBq avaient été distribuées sur une surface de près de 3000 m² à environ 3 km au sud-ouest de Liestal. Ces sources ne sont pas visibles sur les cartes du DDA et du rapport MMGC de la Figure 12figure 12.

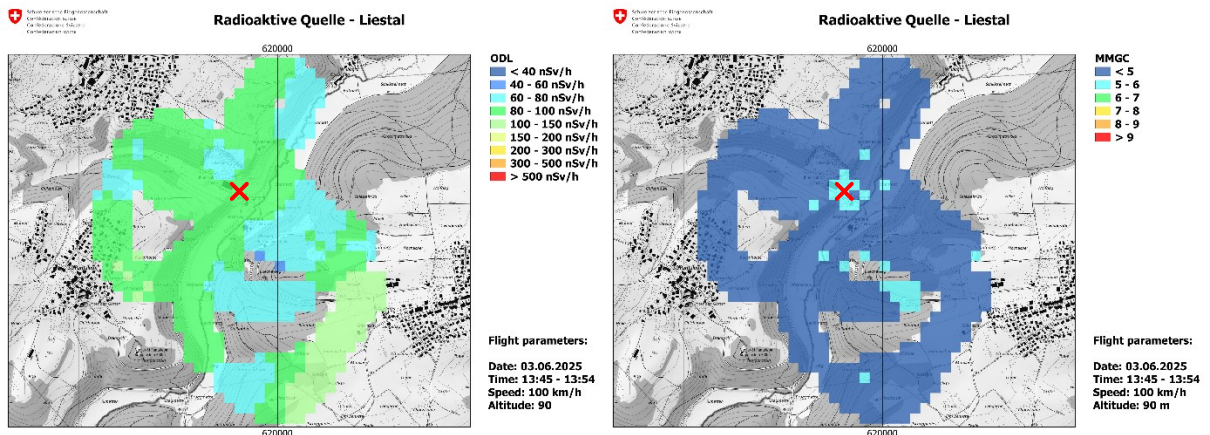


Figure 12 : Mission 3 – identification des sources au sud-ouest de Liestal. Sur la carte du DDA (à gauche), on ne discerne pas les sources de ^{137}Cs déposées. On voit sur la carte de droite que le rapport MMGC est légèrement plus élevé à l'emplacement des sources (en rouge). Cette variation ne se distingue toutefois que difficilement du bruit de fond.

Pendant le vol, les sources de ^{137}Cs ont pu être localisées et identifiées avec succès. La capture d'écran de la

Figure 13 est tirée du logiciel de mesure. On y voit nettement les sources de Cs, même si elles semblent n'être qu'une seule et unique source. Les lignes de vol sont représentées par les lignes blanches, tandis que les cercles rouges contenant le symbole de la radioactivité marquent les emplacements des sources détectées. La résolution temporelle étant d'une seconde, plusieurs détectations ont été enregistrées. En post-traitement, la radioactivité du ^{137}Cs a été estimée à 464 MBq, un résultat suffisamment proche de la valeur effective de 400 MBq. Cette radioactivité est légèrement en deçà de la limite de détection du dispositif de mesure utilisé.



Figure 13 : Mission 3 – identification des sources au sud-ouest de Liestal. Capture d'écran du logiciel de mesure après plusieurs survols de l'emplacement des sources.

Le deuxième POI se trouvait à environ 2 km au sud-est de Zeihen. Les sources affichaient des radioactivités de 700 MBq pour le ^{137}Cs , de 400 MBq pour le baryum 133 (^{133}Ba) et de 160 MBq pour le ^{60}Co . Les cartes du DDA et du rapport MMGC présentées à la Figure 14 ont été obtenues à partir de ces mesures. Le DDA est plus élevé à

l'emplacement des sources, même si la variation n'est pas très marquée. On distingue en revanche très bien la hausse du rapport MMGC.

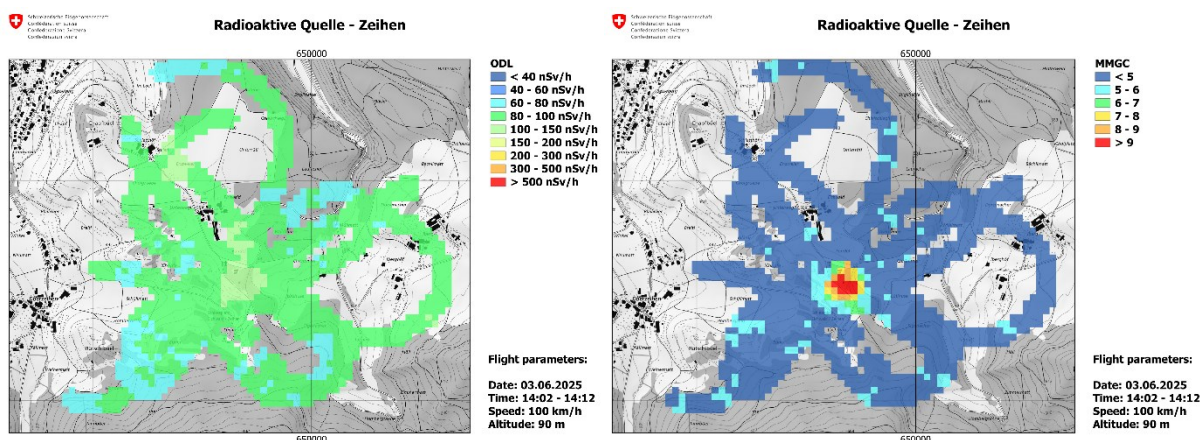


Figure 14 : Mission 3 – identification des sources au sud-ouest de Zeihen. À l'emplacement des sources, la carte du DDA (à gauche) montre des valeurs légèrement élevées, et le rapport MMGC (à droite) est nettement plus haut.

Pendant ce vol aussi, les sources ont pu être localisées et identifiées avec succès. On voit à la figure 15 une capture d'écran du logiciel de mesure. Les radioactivités estimées en post-traitement sont de 1247 MBq pour le ^{137}Cs , de 946 MBq pour le ^{133}Ba et de 153 MBq pour le ^{60}Co .

Les valeurs d'estimation trop élevées (inférieures à un facteur 2) s'expliquent principalement par une mauvaise évaluation de l'altitude de vol. En effet, l'équipe a insuffisamment pris en compte la topographie (colline), le positionnement en hauteur des sources (3 m au-dessus du sol) et le couvert forestier.

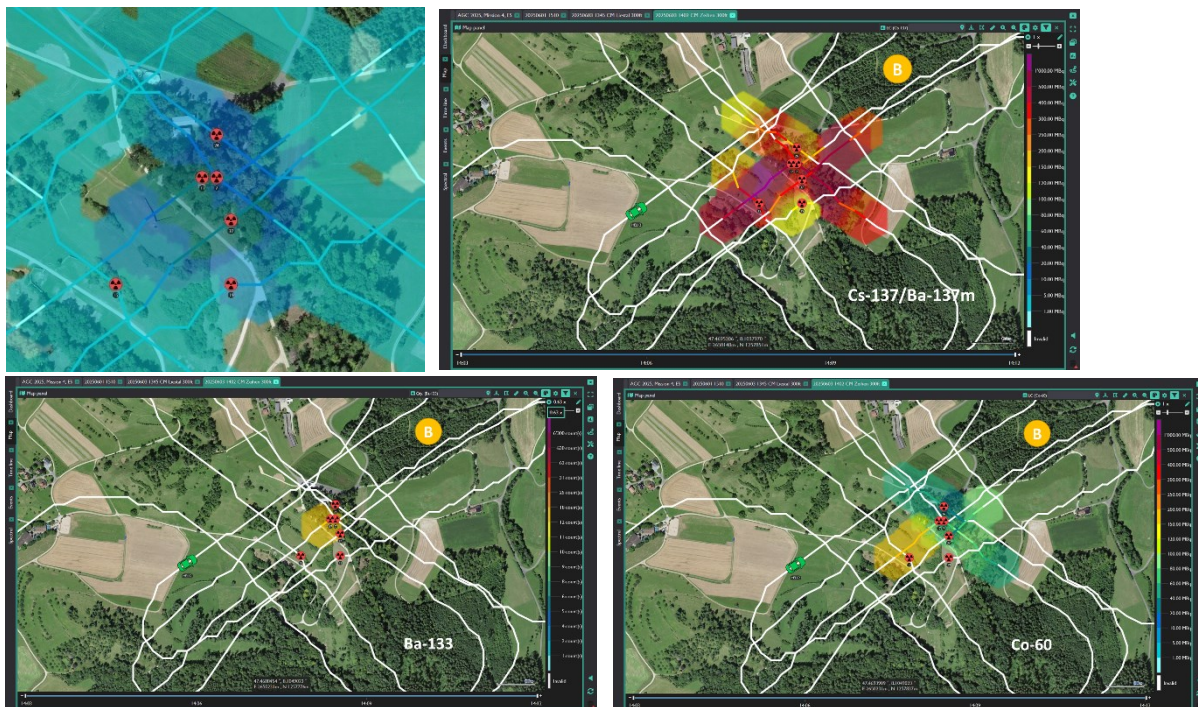


Figure 15 : Mission 3 – identification des sources au sud-ouest de Zeihen. Captures d'écran du logiciel de mesure : identifications (en haut à gauche), cartes de radioactivité du ^{137}Cs (en haut à droite), du ^{133}Ba (en bas à gauche) et du ^{60}Co (en bas à droite).

4.3.3 Mission 3 – établissement d'une carte commune (équipe CHE2) : DDA et rapport MMGC

On trouve à la Figure 16 figure 16 les cartes de DDA et du rapport MMGC du secteur survolé par l'équipe CHE2, situé dans le sud-ouest du périmètre d'exercice. La mission n'a pas permis d'identifier des zones présentant un DDA significativement élevé. Sur la carte du rapport MMGC (à droite), un point où le rapport MMGC est légèrement élevé est identifiable à équidistance de Dagmersellen et de Nebikon ; il est indiqué par une flèche rouge sur les deux cartes. Une source de ^{137}Cs avait effectivement été placée à cet emplacement dans le cadre de l'exercice. Le blindage n'avait toutefois pas été retiré, ce qui a compliqué le travail de détection de l'équipe de mesure.

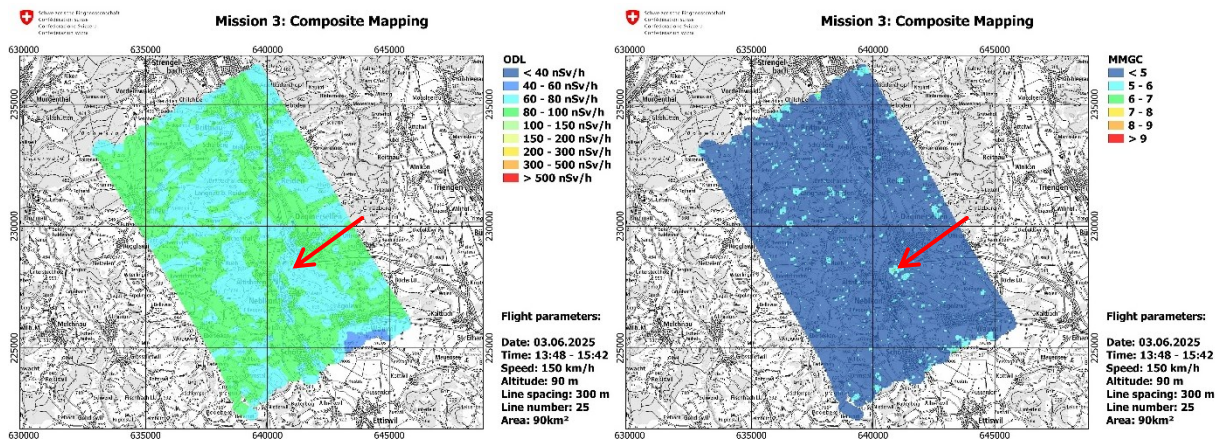


Figure 16 : Mission 3 – établissement d'une carte commune. Cartes DDA et rapport MMGC du secteur survolé par l'équipe CHE2, situé dans le sud-ouest du périmètre d'exercice.

On peut voir à la Figure 17 figure 17 une première carte commune du DDA. Le secteur nord-est a été mesuré une fois par l'équipe CHE1 (au-dessus de la ligne violette) et une seconde fois le lendemain par l'équipe DEU (au-dessous de la ligne violette).

Cette première analyse permet de constater des différences entre les résultats des deux équipes. Ces variations s'expliquent en premier lieu par la sensibilité de l'échelle de couleur choisie dans les valeurs de DDA faibles (<0,1 $\mu\text{Sv/h}$), ce qui met en évidence des écarts même réduits.

De plus, les équipes ont utilisé des systèmes de mesure et des calibrages différents. Sans oublier que les hélicoptères et le positionnement des détecteurs (à l'intérieur et à l'extérieur des appareils) n'étaient pas les mêmes. L'analyse détaillée qui sera effectuée ces prochains mois par le PSI examinera d'autres paramètres. On peut s'attendre à ce qu'il soit procédé à des corrections quantitatives sur la base des missions 1 (mesures de référence) et 2 (mesures du rayonnement de fond), ce qui contribuera probablement à une représentation plus homogène.

Les mesures mises en commun permettent cependant de conclure qu'aucune source de rayonnement ne cause un débit de dose supérieur à l'ordre de grandeur de 0,1 $\mu\text{Sv/h}$ qu'on peut attendre sur le Plateau.

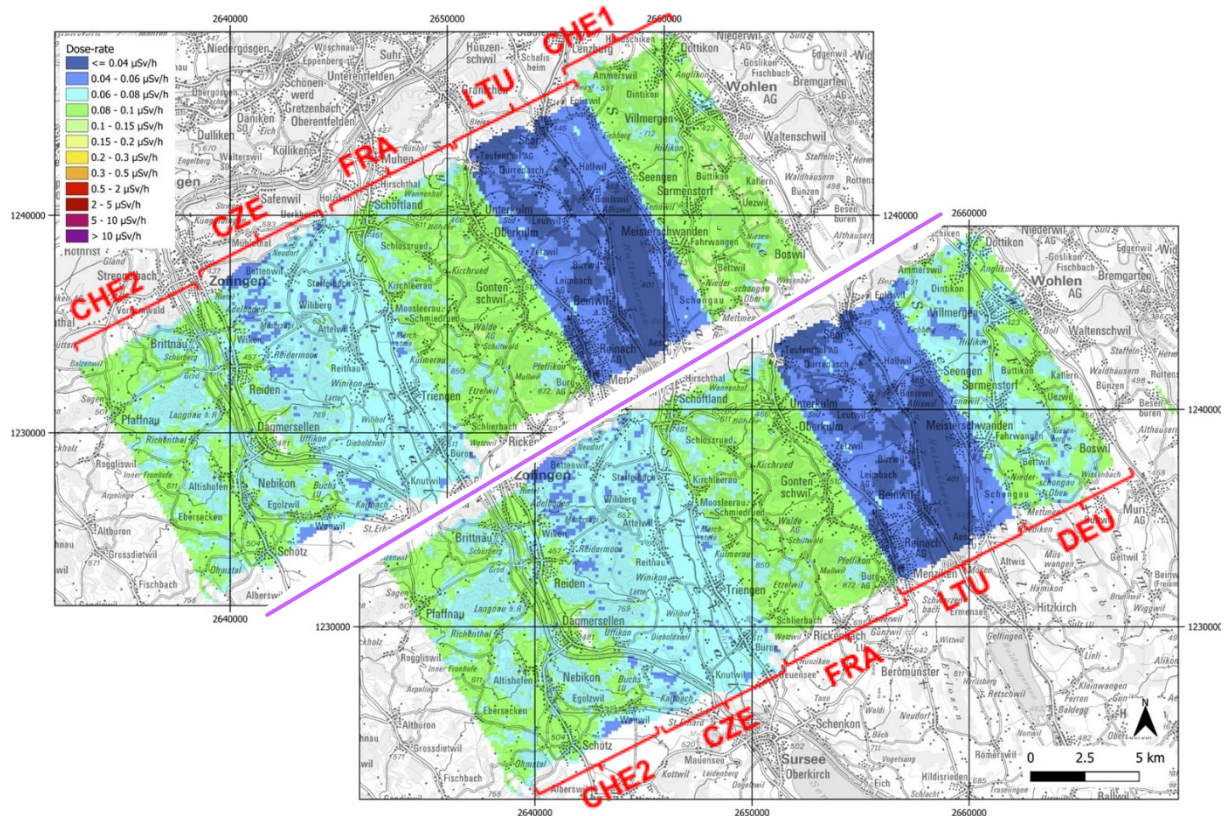


Figure 17 : Mission 3 – établissement d'une carte commune. Carte commune du DDA établie à l'aide des mesures fournies par toutes les équipes participantes. La carte au-dessus de la ligne violette est celle utilisant les données de l'équipe CHE1 pour le secteur nord-est. La carte au-dessous de la ligne violette est la carte combinée dressée à l'aide des valeurs mesurées le lendemain par l'équipe DEU pour le secteur nord-est (source : PSI).

4.4 Mission 4 : recherche de sources

Le mercredi, toutes les équipes de mesure ont accompli la même mission : rechercher des sources sur la place d'armes de Frauenfeld. La direction d'exercice a défini un périmètre ainsi que des points d'entrée et de sortie (« Entry/Exit Points ») et a fixé un temps d'intervention dans la zone de 30 minutes au maximum par équipe. Le planning était serré, car seule une demi-journée était prévue pour que les six équipes héliportées mesurent le secteur délimité l'une après l'autre. À l'origine, l'équipe CHE1 devait passer en premier, suivie des équipes des partenaires internationaux, et l'équipe CHE2 devait clore l'exercice. Afin d'accorder davantage de temps à l'équipe DEU pour régler le problème technique de son hélicoptère, les plages horaires des équipes DEU et CHE2 ont été interverties.

4.4.1 Mission 4 – informations sur le vol (équipe CHE1)

Date et heure CHE1 : 4.6.2025, 7 h 55 – 9 h 26 Durée du vol : 30 min
 Lignes de vol CHE1 : 15 lignes, espacement de 125 m Zone survolée : env. 6 km²
 Hauteur : env. 90 m

Restrictions imposées par la direction de l'exercice : entrée à l'ouest et sortie à l'est de la zone, durée de vol maximale de 30 min par équipe

Remarque de la direction d'exercice : virages autorisés hors de la zone de vol

4.4.2 Mission 4 – résultats de la recherche de sources

La carte du rapport MMGC à la Figure 18 figure 18 montre que deux POI (POI1 et POI2) avec des rapports entre 6 et 8 ont été trouvés dans le périmètre de recherche. Le POI2 ayant été survolé à deux reprises en très peu de temps par l'hélicoptère de mesure, le spectre pour ce point apparaît deux fois dans le tiers supérieur du diagramme de la Figure 20 figure 20, photographié par les opérateurs pendant le vol.

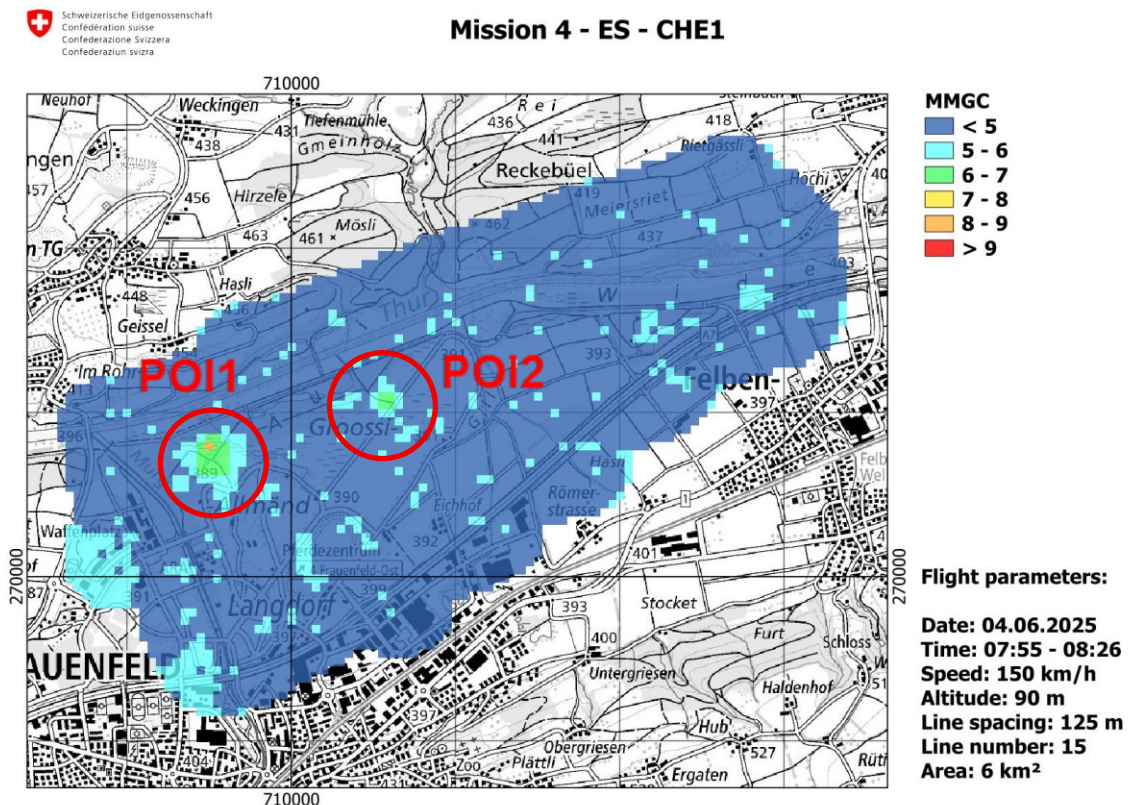


Figure 18 : Mission 4 – recherche de sources. Carte du rapport MMGC établie par l'équipe CHE1 pour la zone survolée à la place d'armes de Frauenfeld. On distingue deux POI avec des rapports MMGC situés entre 6 et 8.

Aucune détection automatique n'a eu lieu pendant le vol. Le signal caractéristique du ¹³⁷Cs a néanmoins pu être observé à env. 660 keV pour les deux POI.

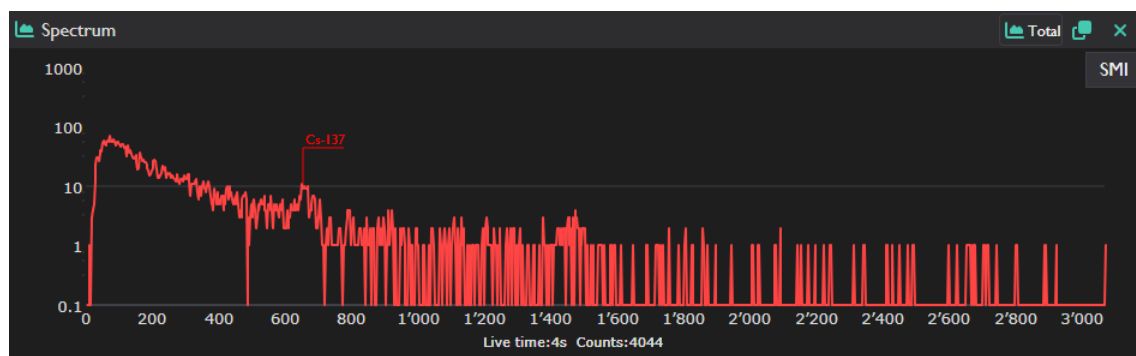


Figure 19 : Mission 4 – recherche de sources. Spectre observé avec signal caractéristique du ¹³⁷Cs à 660 keV pour le POI2.

Pour le POI2, la détection a pu être aisément suivie dans le spectre (voir Figure 20figure 20). Il a été décidé, afin de mieux délimiter la position des sources et en estimer la radioactivité, de densifier les données en rajoutant des lignes de vol perpendiculaires à celles imposées.

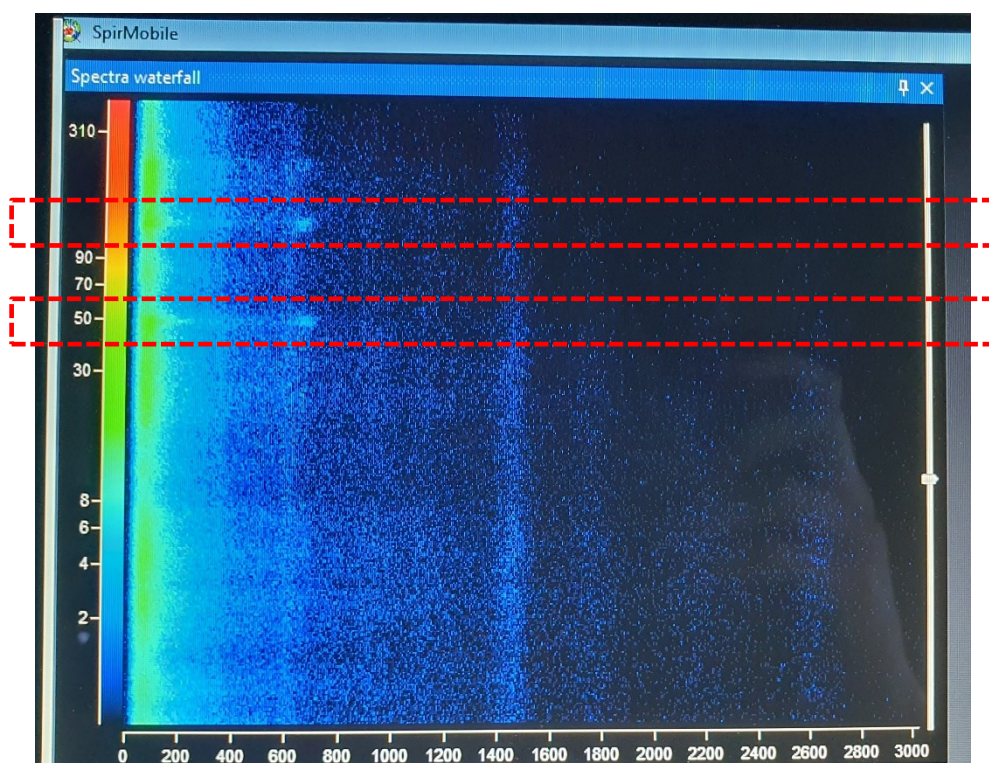


Figure 20 : Mission 4 – recherche de sources. Diagramme après le deuxième survol du POI2, avec pour ce point deux spectres d'énergie très proches, dans le tiers supérieur (encadrés).

La Figure 21figure 21 représente le spectre d'énergie au POI1. On distingue les pics caractéristiques du ^{133}Ba à 302 keV et 356 keV ainsi que celui du ^{137}Cs à 662 keV. Une source de ^{60}Co avait également été déposée au POI1, mais sa radioactivité trop faible n'a pas été détectée par les instruments de mesure. Le pic à 662 keV visible dans le spectre du POI2, à la Figure 22figure 22, indique la présence de ^{137}Cs . Il n'avait pas été disposé d'autre radionucléide au POI2.

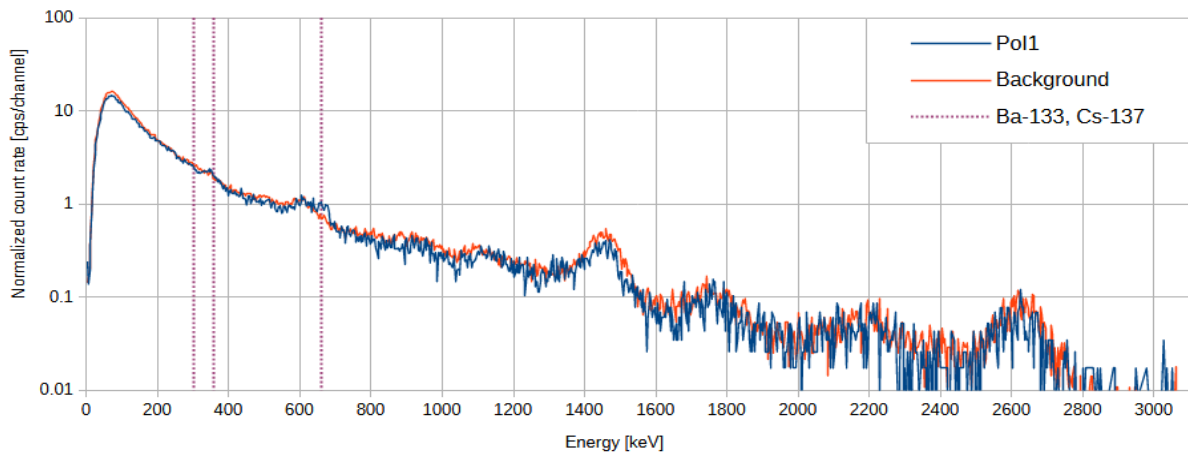


Figure 21 : Mission 4 – recherche de sources. Spectre d'énergie au POI1. On distingue les pics caractéristiques du ^{137}Ba à 302 keV et 356 keV, ainsi que celui du ^{137}Cs à 662 keV, en particulier lorsqu'on compare les valeurs obtenues au signal de fond.

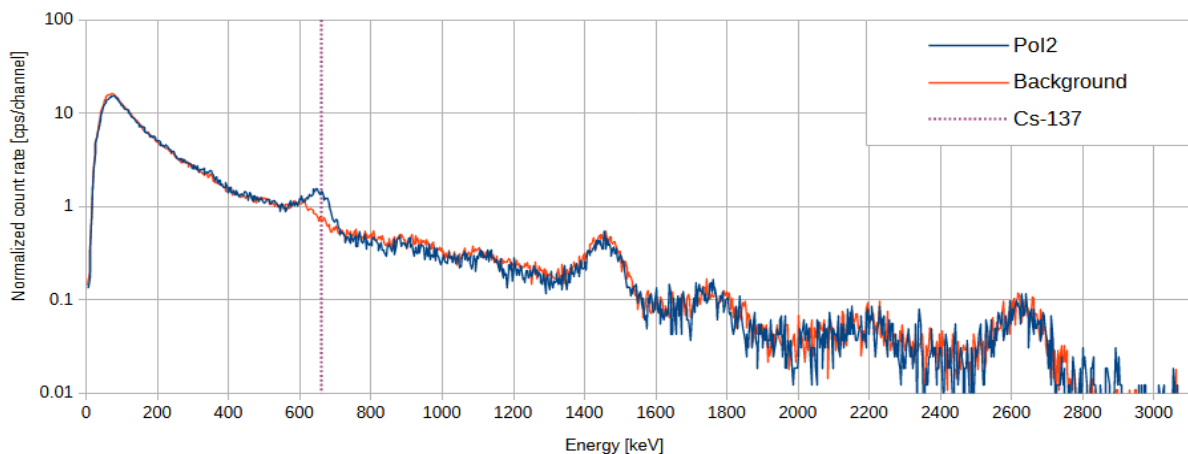


Figure 22 : Mission 4 – recherche de sources. Spectre d'énergie au POI2. Seul le pic caractéristique du ^{137}Cs à 662 keV se distingue du signal de fond.

Si l'on suppose que le débit de dose net de 7 nanoSv/h à 106 m de distance qu'a mesuré le détecteur est essentiellement dû au ^{137}Cs , on peut estimer la radioactivité au POI1 à 0,85 GBq. Une estimation du pire cas possible peut aussi être faite pour le ^{133}Ba , même si le spectre montre un signal bien plus fort pour le ^{137}Cs . En utilisant les mêmes paramètres, soit 7 nanoSv/h à 106 m de distance, on obtient une radioactivité de 925 MBq pour le ^{133}Ba .

Les valeurs effectives étaient de 700 MBq pour le ^{137}Cs et de 400 MBq pour le ^{133}Ba . Une source de ^{60}Co de faible radioactivité (160 MBq) avait en outre été disposée. Les estimations se situent donc dans le bon ordre de grandeur. La source de ^{60}Co n'a pu être ni localisée ni identifiée du fait de sa faible radioactivité, tout juste en dessous de la limite de détection du système de mesure, ainsi que des signaux notablement plus forts des sources de ^{137}Cs et de ^{133}Ba .

La radioactivité des sources du POI2 a été estimée à 0,40 GBq ^{137}Cs , ce qui correspond très précisément à la source de ^{137}Cs utilisée. Comme aucun autre radionucléide n'avait été disposé, il semble logique que l'estimation faite pour le POI2 ait été plus exacte que celle donnée pour le POI1.

Le même exercice a été accompli l'après-midi sur la place d'armes de Frauenfeld par cinq équipes utilisant des drones. Celles-ci venaient d'Allemagne, de France, de Lituanie, de Tchéquie et de Suisse. Deux périmètres de plus petite taille que celui du matin avaient été définis. L'équipe suisse était composée de collaborateurs du Laboratoire de Spiez équipés d'un drone Acecore Noa. Le détecteur était un NaI 3 × 3-pouces de l'entreprise Nuvia.

Les premières mesures sont représentées à la Figure 23. Des sources radioactives ont pu être localisées aux deux emplacements. Pour l'heure, une identification précise et une estimation de la radioactivité sont uniquement possibles en post-traitement. Ce processus est en outre assez exigeant, car les systèmes des drones ne sont pas encore calibrés.



Figure 23 : Mission 4 – recherche de sources avec drones. Cartes du DDA des deux périmètres définis pour les drones établies par le Laboratoire de Spiez (CHE).

Il ressort néanmoins de l'exercice que les drones peuvent servir à identifier rapidement des sources de danger dans des zones de petite surface, fournissant des informations précieuses pour la planification ciblée de l'intervention d'équipes au sol.

L'analyse détaillée des mesures sera incluse dans le rapport établi par le PSI en collaboration avec le Laboratoire de Spiez.

4.5 Mission 5 : vol de mesures mixte

Le vol de mesures mixte au-dessus des installations du PSI et de la zone située au nord du site a été effectué par l'équipe CHE1 le lundi après-midi et par l'équipe CHE2 le jeudi matin.

4.5.1 Mission 5 : informations sur le vol de mesures mixte

Date et heure CHE1 : 2.6.2025, 14 h 58 – 15 h 25 Durée du vol : 27 min

Lignes de vol CHE1 : 8+ 1 lignes, espacement de 250 m Zone survolée : env. 12 km²

Hauteur : env. 90 à 150 m

Restrictions imposées par la direction d'exercice : durée de vol maximale de 30 min pour les secteurs A+B. Le secteur B est interdit

jusqu'à la fin des mesures sur le secteur A. La première ligne du secteur B doit être parcourue du nord au sud.

4.5.2 Mission 5 : DDA

La carte de la Figure 24figure 24 montre sur le site du PSI Ouest, au nord du synchrotron, une zone où le DDA est élevé. Le pic que l'on peut voir dans le spectre gamma de la Figure 25figure 25 à 511 keV permet d'établir qu'il s'agit d'une annihilation électron-positron due à une altération des mesures décrite dans le rapport d'exercice de la campagne de mesures aéroradiométriques 2024. Le rayonnement neutronique présent dans l'installation induit de la radioactivité dans certaines parties de l'air ambiant, qui, en l'espace de quelques minutes, retournent à un état de repos après leur rejet par la cheminée d'évacuation. Cette dernière est d'une hauteur de 30 m, ce qui a entraîné une surévaluation du rayonnement émis par les photons. En effet, les instruments sont calibrés pour mesurer des sources radioactives au sol. Le rejet de ces composants atmosphériques activés est autorisé et surveillé, et un bilan est établi. L'observation de cette légère augmentation du DDA et d'une hausse du rapport MMGC à PSI Ouest coïncide avec les mesures du vent effectuées par MétéoSuisse à la station météorologique du PSI.

On distingue dans la partie sud de la carte, près de l'accélérateur linéaire SwissFEL, une zone présentant un DDA nettement plus élevé. Ces valeurs s'expliquent par la présence d'une source de ^{75}Se placée par la direction d'exercice.

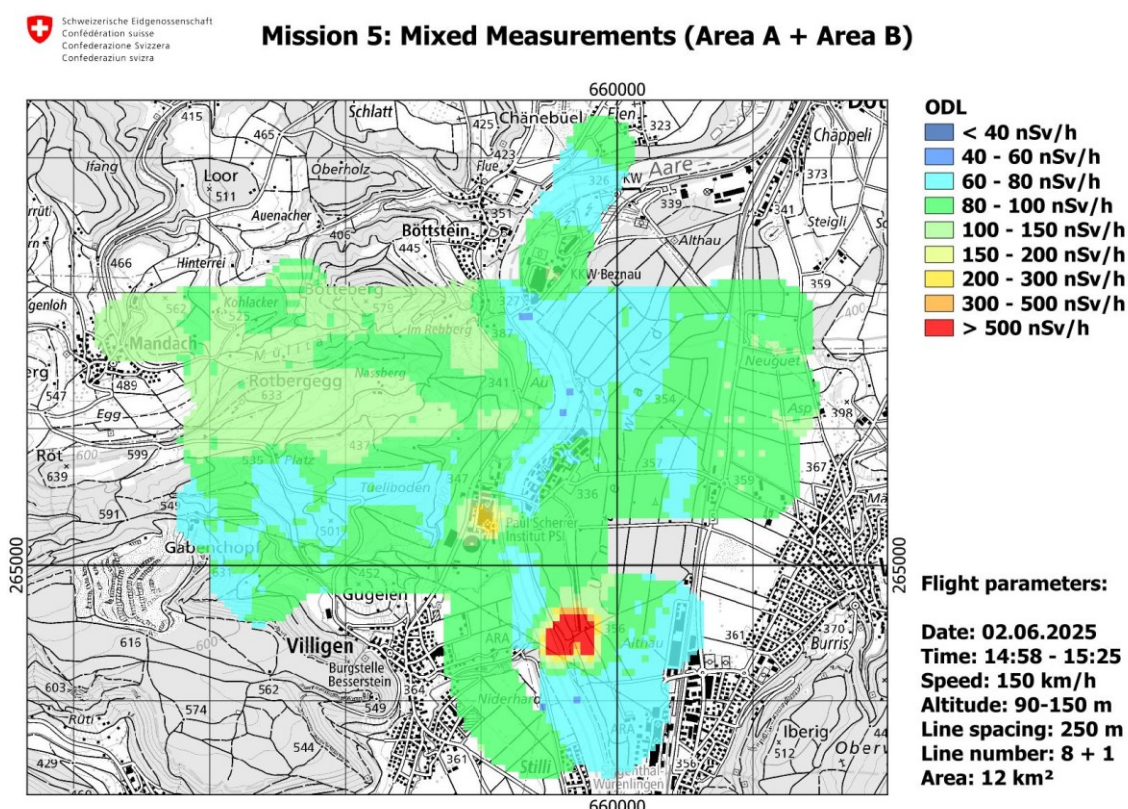


Figure 24 : Carte du DDA aux environs du PSI

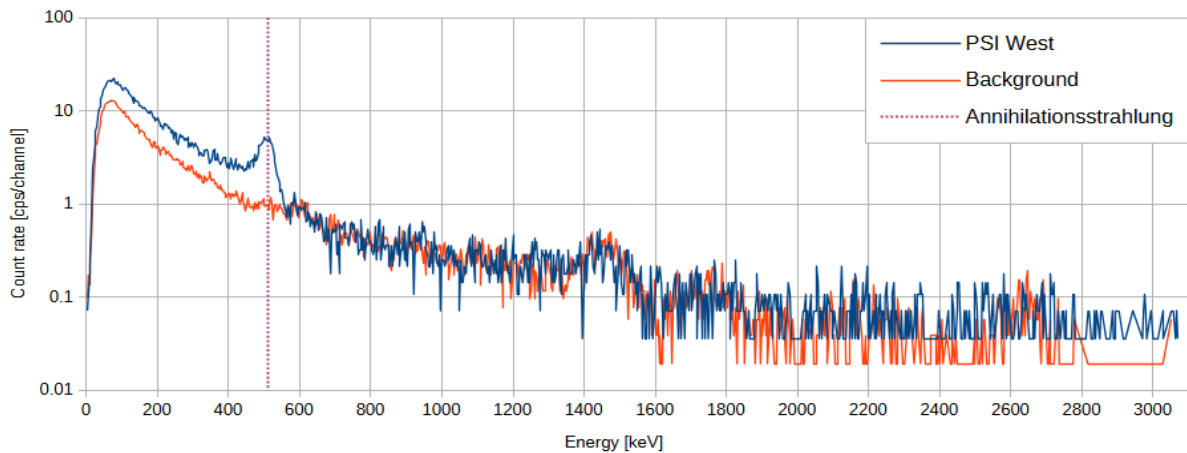


Figure 25 : Spectre gamma des points présentant un DDA élevé sur le site du PSI Ouest, au nord de l'accélérateur. Le pic caractéristique d'une annihilation électron-positron est clairement visible à 511 keV.

4.5.3 Mission 5 : rapport MMGC

Outre les zones présentant un DDA élevé, on peut voir à la Figure 26 un secteur situé au nord de PSI Est où le rapport MMGC est élevé. À la Figure 30, on ne relève aucun élément remarquable pour les valeurs d'énergie inférieures du spectre gamma. On constate toutefois une quasi-absence d'impulsions pour les énergies supérieures, ce qui contribue également à un rapport MMGC élevé. Au SwissFEL, les valeurs pour le rapport MMGC passent sans transition de <5 à plus de 1000, ce qui indique que la source était bien protégée sur les côtés.

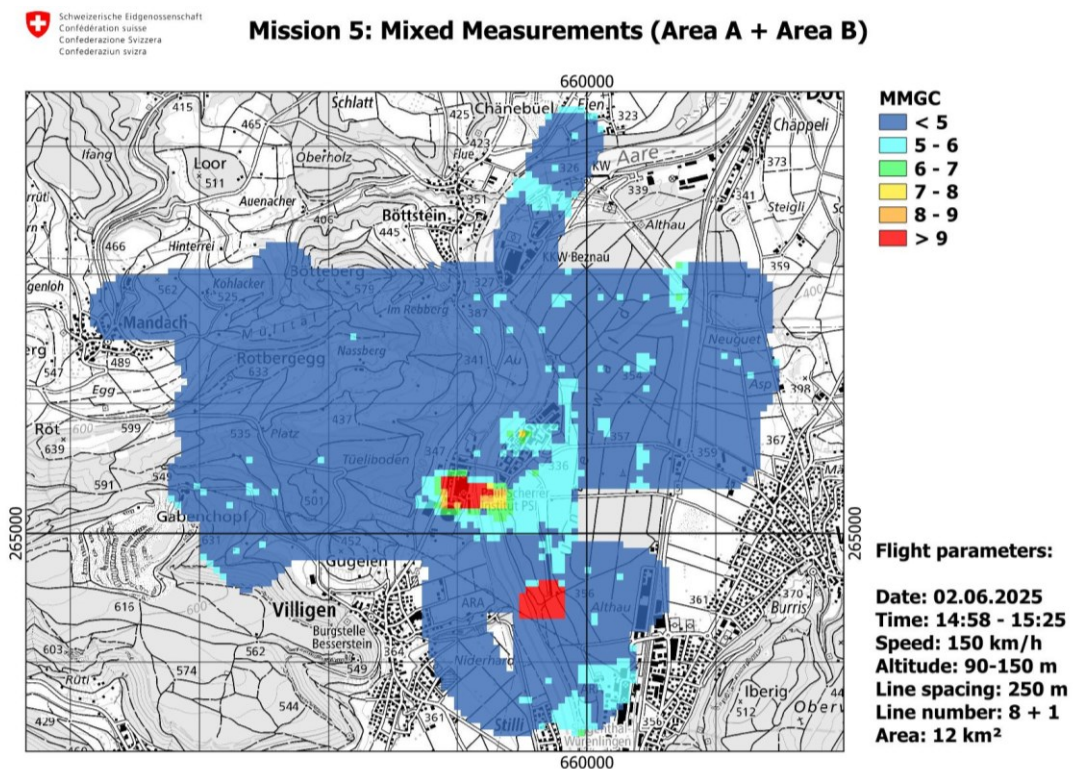


Figure 26 : Carte du rapport MMGC aux alentours du PSI

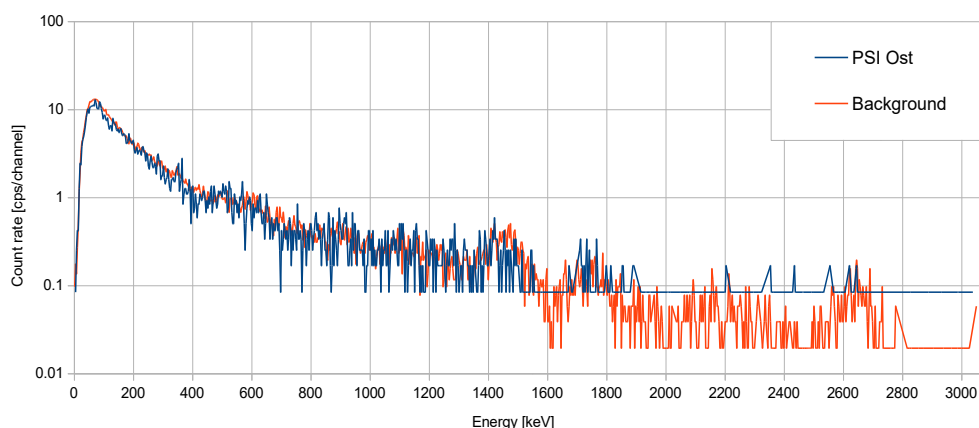


Figure 27 : Spectre gamma des emplacements présentant un rapport MMGC élevé dans le secteur au nord de PSI Est. On ne distingue aucun pic marqué, mais une quasi-absence d'impulsions pour les valeurs d'énergie supérieures, ce qui contribue à un rapport MMGC élevé.

À la Figure 28 figure 28, l'échelle de couleurs a été adaptée afin de montrer le rapport MMGC sur une image satellite du secteur au sud du SwissFEL. La zone en rouge permet une localisation relativement précise de la source, dont l'emplacement exact est signalé par une croix.

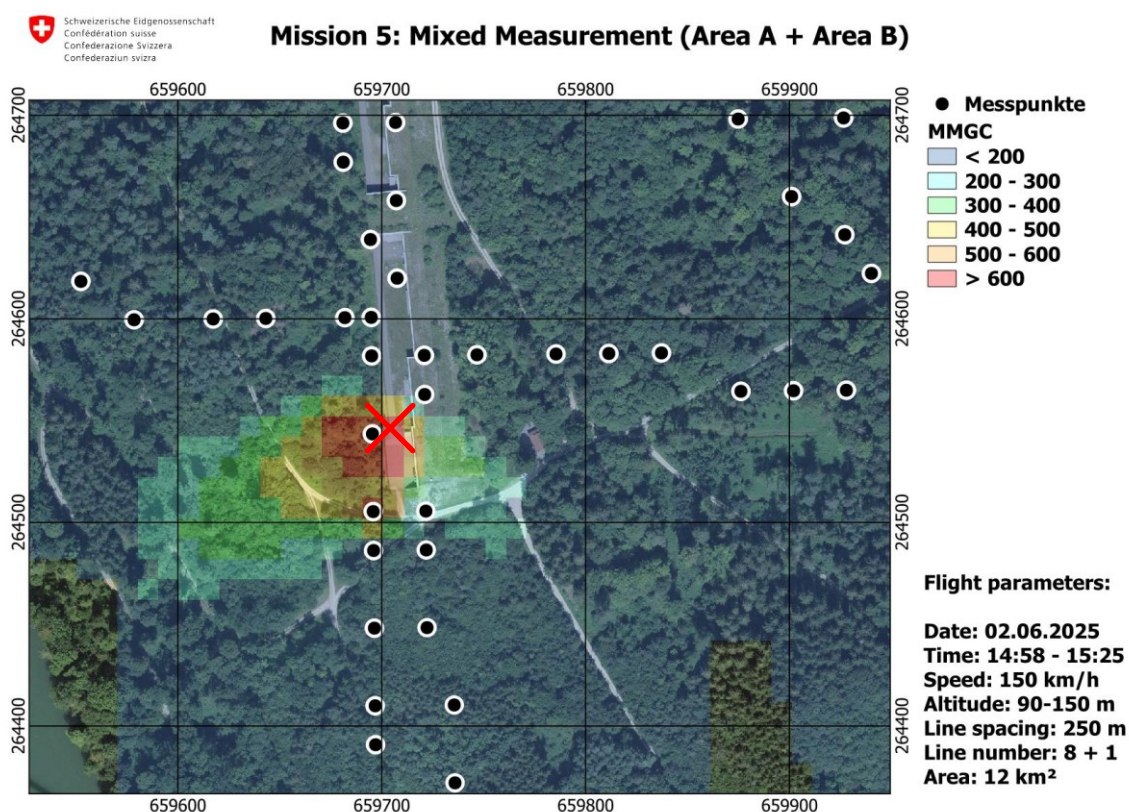


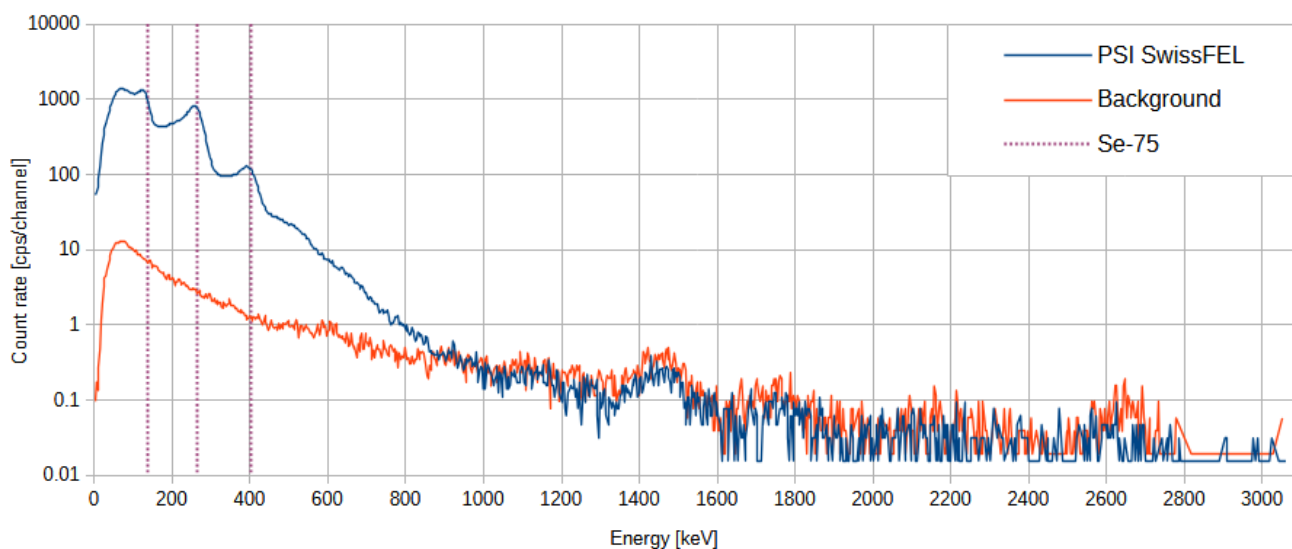
Figure 28 : Rapport MMGC sur une image satellite du secteur au sud du SwissFEL. Les points de mesure montrent que l'équipe CHE1 a survolé deux fois l'installation dans l'axe nord-sud, et une fois dans l'axe est-ouest. L'échelle des couleurs a été changée afin que la forte radioactivité de la source soit mieux visible. La fonction d'interpolation du logiciel de mesure explique les ombrages à plus grande distance de la source. L'emplacement de la source est marqué d'une croix rouge.

La photo de la Figure 29 a été prise depuis l'hélicoptère de l'équipe CHE1. On y voit la façon dont est disposée la source.



Figure 29 : Emplacement de la source de ^{75}Se , photographiée depuis l'hélicoptère de l'équipe CHE1 lors du vol au-dessus du SwissFEL

À la Figure 30, on voit clairement dans le spectre gamma des points de mesure présentant les rapports MMGC dans le secteur au sud du SwissFEL les pics d'énergie caractéristiques du ^{75}Se à 136, 265 et 401 keV, ce qui permet d'identifier aisément le



radionucléide.

Figure 30 : Spectre gamma des points de mesure au niveau de la source de ^{75}Se , avec des pics d'énergie caractéristiques à 136, 265 et 401 keV

Comme les instruments de mesure ne sont pas calibrés pour quantifier une source de ^{75}Se , il n'a pas été possible de procéder à une estimation automatique plausible de la radioactivité. Au point de mesure le plus proche de la source, le détecteur a enregistré un débit de dose de 3,0 $\mu\text{Sv/h}$ à une altitude de vol de 92 m. Le coefficient de dose pour une irradiation externe est

pour le ^{75}Se de $h_{10}(^{75}\text{Se}) = 64 \text{ } (\mu\text{Sv/h})/\text{GBq}$ à une distance de 1 m. Ces valeurs ont permis d'estimer la radioactivité de la source en appliquant la loi de l'inverse du carré de la distance :

$$A = \frac{DD_{\text{Décteur}} \cdot FH^2}{h_{10}(^{75}\text{Se}) \cdot (1\text{m})^2} = \frac{3.0 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}} \cdot (92\text{m})^2}{64 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h} \cdot \text{GBq}}} \approx 400\text{GBq}$$

Le blindage de la source n'était ouvert et collimaté que vers le haut, garantissant une protection efficace sur les côtés. Comme la vitesse de vol était élevée et que l'appareil n'a pas opéré un passage exactement centré sur la source, le débit de dose effectif et la radioactivité qu'on pouvait en déduire ont très probablement été sous-estimés. Une plus grande précision aurait pu être atteinte si l'hélicoptère avait survolé directement la source, éventuellement de manière stationnaire. Il semble donc plausible que la radioactivité effective de la source se situe nettement au-dessus des 400 GBq calculés.

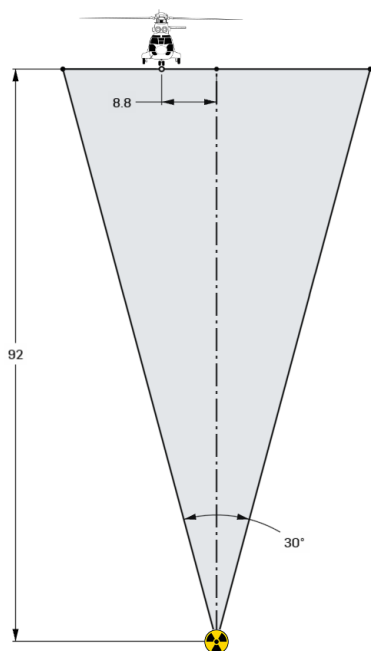


Figure 31 : Représentation de la position de l'hélicoptère au-dessus de la source. D'après la mesure du GPS, qui s'accompagne également d'une certaine imprécision, l'appareil est passé à 8,8 m à côté de la verticale de la source. Sa vitesse de vol était de 100 km/h.

4.5.4 Mission 5 : Anomalie de ^{232}Th

La carte de la Figure 32 figure 32 représente les mesures de ^{232}Th . Dans le secteur ouest du périmètre de vol, à mi-distance entre la commune de Mandach et le PSI, on distingue nettement l'anomalie naturelle déjà constatée lors des programmes de mesures standard précédents. En Suisse, la concentration de ^{232}Th se situe habituellement entre 20 et 30 Bq/kg. Or les valeurs mesurées dans la région de Mandach atteignent 75 Bq/kg. Cette teneur élevée dans le sol entraîne une légère hausse du DDA, qu'on peut discerner sur la carte du DDA en Figure 24 figure 24.

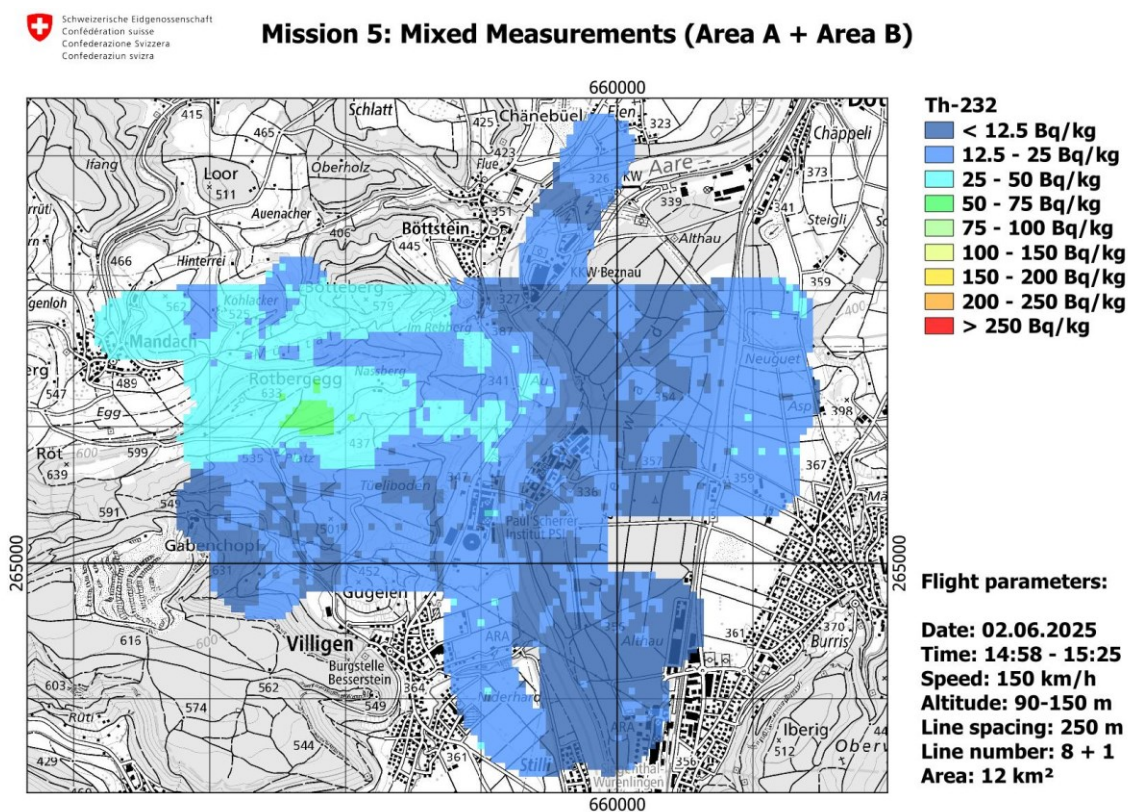


Figure 32 : Carte du ^{232}Th aux alentours du PSI

5 Bilan

- Les objectifs fixés pour la campagne de mesures aéroradiométriques 2025 ont été atteints. Le programme de mesures standard prévu dans les environs des centrales nucléaires de Gösgen et de Mühleberg a pu être mené à bien.
- Dans le cadre de la campagne de mesures internationale, les participants ont réalisé des tâches exigeantes. Face aux conditions météorologiques et à un problème technique de l'appareil allemand, les équipes ont toutes dû montrer une grande flexibilité et une importante capacité à planifier les interventions à court terme. Les six équipes ont néanmoins pu accomplir les cinq missions prévues avec succès, tout en respectant les restrictions imposées par la direction d'exercice.
- La planification de la mission consacrée à l'établissement d'une carte composite a dû être revue en raison des conditions météorologiques défavorables. Malgré ces changements intervenus tout juste deux heures avant le début des opérations, les opérations ont pu se dérouler avec efficacité sous la houlette de l'équipe suisse : cinq équipes hélicoptérées ont procédé simultanément aux mesures, et les données récoltées ont rapidement pu être rassemblées afin de dresser une carte commune. La carte aurait été suffisante pour conduire une première analyse de la situation radiologique et planifier des mesures subséquentes.
- Lors des cinq missions, les équipes ont dû répondre à des exigences élevées. En effet, la direction d'exercice souhaitait tester les limites des systèmes de mesure, entre autres en disposant des sources dont la faible radioactivité était proche du seuil de détection, et d'autres dont la radioactivité pouvait être assez forte pour saturer les détecteurs. La plupart des sources ont néanmoins pu être identifiées avec succès, notamment par l'équipe suisse, y compris certaines dont la radioactivité était inférieure à la limite de détection spécifiée. Aucun épisode de saturation ne s'est produit. Les systèmes de mesure ont donc affiché des performances supérieures à celles initialement spécifiées.
- L'utilisation parallèle de deux hélicoptères suisses a permis de comparer les procédures d'intervention. Les deux équipages (CENAL et EM CF CENAL/Centre de compétence NBC-DEMUNEX), qui s'entraînent habituellement chacun de leur côté, ont en outre pu échanger de manière ciblée sur leurs expériences et leurs résultats. Enfin, il a été possible de tester différentes configurations des systèmes dans des conditions d'intervention identiques et d'évaluer leurs forces et leurs faiblesses dans des situations concrètes. Deux missions se sont déroulées avec des équipes mixtes.
- Les petits débriefings quotidiens mis en place par la direction d'exercice se sont avérés positifs. Ils ont permis tant à la direction d'exercice qu'aux équipes d'avoir une vue d'ensemble transparente des activités effectuées et de pouvoir exprimer remarques et feed-back.
- L'équipe suédoise, qui devait à l'origine participer essentiellement à titre d'observatrice, a finalement procédé à plusieurs mesures.
- Les campagnes de mesures internationales sont importantes pour s'entraîner à la conduite d'interventions aéroradiométriques communes et encourager les échanges d'expériences entre partenaires internationaux. Bien connaître les stratégies en matière de mesure, les caractéristiques des données et les méthodes d'analyse des différents partenaires est crucial pour assurer une collaboration efficace en cas d'événement.
- Pour la première fois en Suisse, une campagne de mesures internationale a vu la participation de cinq équipes munies de drones. Cet événement a constitué une précieuse occasion de mieux connaître ces systèmes de mesure relativement récents et de procéder à une première comparaison entre partenaires internationaux. Pour l'instant, les drones n'atteignent pas le niveau des hélicoptères concernant la spectrométrie

gamma, en particulier faute d'un calibrage standard et d'une analyse des données encore fondamentale pendant le vol. Cette technologie dispose toutefois d'un fort potentiel et permet déjà d'identifier des points présentant un intérêt sur le plan radiologique, même s'il n'est souvent pas possible d'obtenir des informations complémentaires. Aucun des drones utilisés n'est pour l'heure intégré officiellement au sein d'organisations de crise, même s'ils pourraient apporter une aide précieuse en cas de besoin.

L'aéroradiométrie et les mesures effectuées à l'aide de drones sont deux méthodes de mesure parfaitement complémentaires. Si l'aéroradiométrie permet de rapidement dresser un tableau complet de la situation radiologique et d'identifier les secteurs dangereux, les drones fournissent des informations détaillées supplémentaires avec un haut degré de résolution. Grâce à ces dernières, il est possible de planifier de manière ciblée et efficiente l'engagement d'équipes au sol, et d'ainsi obtenir encore plus vite une vue d'ensemble précise de la situation radiologique.

- Les processus de présentation des résultats de mesure ont été vérifiés, mis en pratique et optimisés.
- Les spécialistes des mesures de la radioactivité, les techniciens et les pilotes de l'équipe d'aéroradiométrie disposent d'un excellent niveau de formation et d'entraînement.

Annexe A : Généralités

Comment fonctionne l'aéroradiométrie ?

La [fiche technique Aéroradiométrie](#) donne une description détaillée de la méthode de mesure et de l'équipement utilisé.

Évaluation des données aéroradiométriques

La méthode d'évaluation des données aéroradiométriques est décrite dans SCHWARZ, G.F., 1991 : Methodische Entwicklungen zur Aerogammaspektrometrie (Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geophysik Nr. 23, Commission suisse de géophysique).

Dans la pratique, on utilise souvent une procédure simple pour évaluer les mesures aéroradiométriques directement sur le terrain. Deux méthodes ont fait leurs preuves :

1. Rapport MMGC : cette méthode est fondée sur la détermination du rapport entre les deux extrémités du spectre d'énergie. Les radionucléides artificiels produisant en général uniquement des rayonnements gamma faiblement énergétiques, ce rapport correspond à peu près au rapport entre le rayonnement artificiel et le rayonnement naturel.
2. Estimation du débit de dose ambiant : la somme des produits du taux de comptage et de l'énergie du canal sur tous les canaux du spectre d'énergie est proportionnelle au débit de dose à l'emplacement du détecteur. De ce débit de dose, on soustrait le bruit de fond du détecteur (environ 2 nSv/h) et le débit de dose dû au rayonnement cosmique (mesuré par un canal de comptage spécifique pour les photons de haute énergie), ce qui donne le débit de dose terrestre à l'emplacement du détecteur. Le débit de dose ambiant terrestre est ensuite calculé par une correction exponentielle de l'altitude de vol à un mètre au-dessus du sol. L'estimation du débit de dose ambiant total se fait en ajoutant le débit de dose cosmique à un mètre du sol, qui est calculé par la formule de l'altitude des rayons cosmiques.

Lors de l'interprétation des cartes aéroradiométriques, il convient de tenir compte du fait que les mesures effectuées en vol à une hauteur de 90 m représentent une valeur moyenne sur une surface de 300 m x 300 m (90 000 m²). À titre de comparaison, les mesures au sol ne couvrent qu'une surface de 80 m².

Résultats des mesures effectuées au voisinage des centrales nucléaires

Les installations nucléaires suisses peuvent être détectées grâce à leur rayonnement direct, à l'exception des CN de Beznau et de Gösgen (réacteurs à eau pressurisée). Le champ de rayonnement se limite à l'aire des installations nucléaires. On ne détecte pas de radioactivité artificielle plus élevée aux alentours.

Au PSI, on mesure le rayonnement dû à l'accélérateur (PSI Ouest) et celui dégagé par les déchets radioactifs (dépôt intermédiaire fédéral, PSI Est).

Dans les réacteurs à eau bouillante (centrales nucléaires de Mühleberg et de Leibstadt), le produit d'activation ¹⁶N parvient à la salle des machines avec la vapeur. Le toit de cette salle étant relativement peu blindé, le rayonnement gamma du ¹⁶N peut être très bien détecté de l'extérieur. Les centrales nucléaires équipées de réacteurs à eau pressurisée (centrales de Gösgen et de Beznau) diffusent un très faible rayonnement total et ne sont généralement pas visibles sur la carte.

En dehors du périmètre clôturé des centrales nucléaires, on ne constate aucune augmentation de la radioactivité artificielle qui ne puisse s'expliquer par Tchernobyl ou les essais nucléaires militaires des années 1960. Le niveau d'activité dans les alentours des CN est resté constant ces quinze dernières années.