

CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIERES (C.C.T.P)

Réf. : ASNR/SAME/2025-00029

Acquisition d'un prototype de contrôleur radiométrique pour la gestion des denrées alimentaires en situation post-accidentelle

Rédacteur	Vérificateur	Approbateur
Nom : K. Galliez	Nom : L. Ferreux / E. Barker	Nom : M. Morin
Visa :	Visa :	Visa :

Table des matières

ARTICLE - 1	PRESENTATION GENERALE	4
ARTICLE - 2	OBJET ET PERIMETRE DE LA PRESTATION	4
ARTICLE - 3	ETAT DE L'ART	5
3.1 -	Chaine d'acquisition	5
3.2 -	démélange spectral	7
3.3 -	Traitement du spectre	8
3.1.1	Mode Expert	8
3.3.2	Mode simplifié	8
3.4 -	ETUDE PREMILINAIRE	9
3.4.1	Mesure d'échantillons réels et simulés	9
3.4.2	Incertitudes de mesure	10
3.4.3	Seuil de décision et limite de détection	10
3.4.4	Optimisation mécanique	11
3.4.5	Recalage en énergie	11
3.4.6	Etude des résidus	11
3.4.7	Densité de l'échantillon	12
3.5 -	Conclusion de l'étude préliminaire	12
ARTICLE - 4	CARACTERISTIQUES TECHNIQUES	13
4.1 -	CHAINE D'ACQUISITION	13
4.2 -	Carter DE PROTECTION	13
4.3 -	LOGICIEL D'ACQUISITION ET DE TRAITEMENT DES SPECTRES	14
4.3.1	Fonctionnalités du mode expert	14
4.3.2	Fonctionnalités du mode simplifié	17
4.4 -	ALGORITHME DE DEMELANGE SPECTRAL	18
4.5 -	VARIATION DE LA TEMPERATURE	18
4.6 -	SEQUENCES D'ANALYSE	18
4.6.1	Mode expert	18
4.6.2	Mode simplifié	18
4.7 -	Alimentation électrique	19
ARTICLE - 5	PERFORMANCES ANALYTIQUES	19
ARTICLE - 6	ESSAIS SUR SITE	20
ARTICLE - 7	FORMATION DES UTILISATEURS	20
ARTICLE - 8	JALONS	20
ARTICLE - 9	LIVRAISON ET INSTALLATION	21
ARTICLE - 10	LIVRABLES	21
10.1 -	Livrables matériels	21
10.2 -	Livrables documentaires	21
ARTICLE - 11	PROPRIETE INDUSTRIELLE	21
ARTICLE - 12	GARANTIE	22

12.1 - Durée et périmètre de la garantie	22
12.2 - Délais d'intervention	22
ARTICLE - 13 SUPPORT TECHNIQUE ET ASSISTANCE UTILISATEUR	22
ARTICLE - 14 MAINTENANCE PREVENTIVE ET CURATIVE POST-GARANTIE	22
14.1 - Maintenance préventive	22
14.2 - Interventions curatives : conditions et délais	22
14.3 - Pièces détachées et consommables après-garantie	22
ARTICLE - 15 COORDINATION ET CORRESPONDANTS	22
ANNEXE 1 : DIMENSION DU CONTENANT COMPATIBLE AVEC LE TRI-LATAC POUR LES ETALONNAGES ET CALIBRATIONS.....	23

ARTICLE - 1 PRESENTATION GENERALE

L'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection est une autorité administrative indépendante créée par la loi du 21 mai 2024 relative à l'organisation de la gouvernance de la sûreté nucléaire et de la radioprotection pour répondre au défi de la relance de la filière nucléaire. Elle assure, au nom de l'État, le contrôle des activités nucléaires civiles en France et remplit des missions d'expertise, de recherche, de formation et d'information des publics.

Au sein de l'ASNR, la Direction de la recherche et de l'expertise en environnement (DREE) met en œuvre principalement les actions de recherche et d'expertise en vue d'optimiser la protection et la surveillance de l'environnement.

Plus particulièrement, le Service d'analyses et de métrologie de l'environnement (SAME) a pour mission de développer et maintenir les techniques de traitement et de mesures de la radioactivité d'échantillons prélevés dans l'environnement à l'état de l'art, pour répondre aux problématiques d'études ou de surveillance de l'environnement en situation normale ou accidentelle.

L'un des laboratoires du SAME, le Laboratoire de mesures nucléaires (LMN) exerce son savoir-faire sur de nombreuses techniques radiométriques telles que les spectrométries gamma et alpha, la scintillation liquide et solide et le comptage proportionnel sur des échantillons liquides ou solides. Les mesures effectuées par le LMN s'inscrivent dans la mission surveillance de l'environnement, mais également pour des études menées au sein de l'ASNR pour différents laboratoires.

Le Laboratoire de mesures nucléaires de l'ASNR a pour missions :

- De mesurer la radioactivité dans les échantillons de l'environnement pour la surveillance radiologique du territoire et en soutien des laboratoires de l'ASNR (études, thèses, etc.) ;
- De développer et de maintenir les techniques de mesures de la radioactivité pour répondre aux problématiques d'étude ou de surveillance de l'environnement en situation normale ou accidentelle ;
- D'appuyer techniquement les autorités dans le domaine des inspections, la mesure d'échantillons d'inspections ou de saisines.

ARTICLE - 2 OBJET ET PERIMETRE DE LA PRESTATION

Lors d'un incident nucléaire, des radionucléides peuvent être rejetés dans l'environnement et contaminer de vastes zones à différents niveaux de radioactivité et ainsi se retrouver dans la chaîne alimentaire. En situation post-accidentelle¹, l'un des principaux risques pour la population est donc l'exposition par ingestion d'aliments contaminés par des dépôts radioactifs. Cette évaluation des risques est basée sur la notion de niveau maximal admissible (NMA) défini par le règlement européen Euratom 2016/52. Ce règlement prévoit la prescription d'activités à ne pas dépasser pour les radionucléides dans les denrées alimentaires (liquides, aliments pour nourrissons, autres denrées) après un incident ou un accident nucléaire. Parmi ces radionucléides figurent des émetteurs gamma facilement identifiables tels que le césium 134, le césium 137 et l'iode 131, radionucléides émetteurs gamma rejetés pour la majorité des accidents nucléaires. Ces NMA peuvent être utilisés par les autorités publiques pour prendre des décisions sur la consommation de denrées alimentaires en situation post-accidentelle.

Le LMN a développé un prototype de contrôleur alimentaire ayant pour vocation d'être accessible à tout public. L'objectif de ce prototype est qu'une personne non experte en spectrométrie gamma puisse rapidement faire le contrôle de ses denrées alimentaires en toute autonomie. Le contrôleur alimentaire pourrait également être utilisé par les cellules mobiles de l'ASNR et ainsi être déployé dans les laboratoires mobiles en situation post-accidentelle. Un algorithme de démelange spectral est utilisé pour analyser automatiquement les échantillons.

Le prototype actuel nécessite des améliorations concernant l'ergonomie matérielle et logicielle, la mobilité et l'intégration des différents éléments de la chaîne de mesure et de traitement. Au-delà des performances analytiques sur certains radionucléides d'intérêt principal (¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs et ¹³¹I), le prototype ne dispose aujourd'hui d'aucune protection physique contre les chocs ni pour la sécurité ou la maniabilité de l'ensemble de détection. Il n'est par ailleurs pas 100 % autonome en intégrant l'ensemble des équipements de la chaîne de mesure.

¹ Période faisant suite à la fin des rejets radioactifs dans l'environnement

La chaîne d'acquisition et d'analyse est à ce jour constituée de deux éléments distincts : le premier est une chaîne d'acquisition classique par spectrométrie gamma (détecteur, pré-ampli, ampli, analyseur) et le second est un logiciel de traitement conçu par le LMN permettant le traitement du spectre issu de la mesure par démixage spectral. Ce logiciel ne permet pas de piloter le logiciel d'acquisition. L'application élaborée au LMN pour l'analyse a été développée en C++ nécessite des ajustements pour avoir à disposition une IHM ergonomique et un pilotage intégré de l'électronique de comptage.

Ce projet doit ainsi répondre à trois objectifs :

- disposer d'une enceinte physique simple et robuste permettant d'assurer la sécurité du matériel embarqué et des utilisateurs ;
- intégrer la chaîne d'acquisition et de traitement dans un seul et même logiciel ;
- assurer les performances atteintes en laboratoire lors de l'élaboration du premier prototype :
 - détection et quantification en moins de 5 minutes des principaux radionucléides d'intérêt,
 - limites de détection inférieures aux NMA.

Afin de bien comprendre et assimiler le projet, ce cahier des charges présentera succinctement les performances obtenues sur le prototype actuel lors des essais préliminaires avant de s'intéresser caractéristiques et aux livrables attendus pour cette prestation.

Tableau 1 : niveaux maximaux admissibles (NMA) défini par le règlement européen Euratom 2016/52 pour les émetteurs gamma

	Activité en Bq/kg		
	Aliments liquides	Aliments pour nourrissons	Autres denrées
Somme des isotopes de l'iode, comprenant ^{131}I	500	150	2000
Somme de tous les autres radionucléides émetteurs gamma avec une période supérieure à 10 jours, incluant ^{137}Cs et ^{134}Cs	1000	400	1250

ARTICLE - 3 ETAT DE L'ART

Cette partie concerne l'état du développement actuel du prototype de contrôleur alimentaire détenu au LMN. Le prestataire aura accès à toutes les informations requises pour la fabrication du prototype final.

3.1 - CHAÎNE D'ACQUISITION

Pour des raisons pratiques, le choix a été fait d'utiliser un scintillateur inorganique $\text{LaBr}_3(\text{Ce}+\text{Sr})$. Le cristal de dimension 1,5"x 1,5" est couplé à un tube photomultiplicateur (PMT) 2"x 2" et alimenté par une haute tension et un diviseur de tension. Le tout est associé à un analyseur multicanal (MCA). L'ensemble cristal/PMT est équipé de 14 pins pour le branchement du préamplificateur et a été fourni par l'entreprise Luxium Solutions. Le préamplificateur possède deux branchements, un pour la haute tension (positive) et l'autre pour la sortie du signal. Le générateur haute tension est le module fourni par SEPH-ALM.

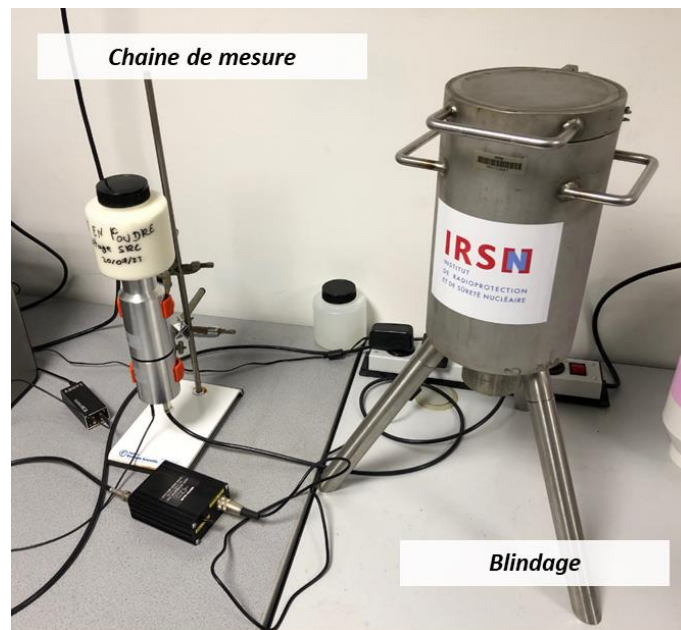


Figure 1 : Prototype du contrôleur alimentaire au LMN



Figure 2 : Références du préamplificateur et cristal/PMT



Figure 3 : Générateur de haute tension

Pour numériser le signal de sortie, un analyseur multicanal nanoMCA de LabZY a été utilisé. Il permet d'acquérir un spectre sur 16384 canaux à une fréquence de 80 MHz. Il ne nécessite pas de branchement sur secteur, ce qui présente un grand avantage.



Figure 4 : nanoMCA LabZY

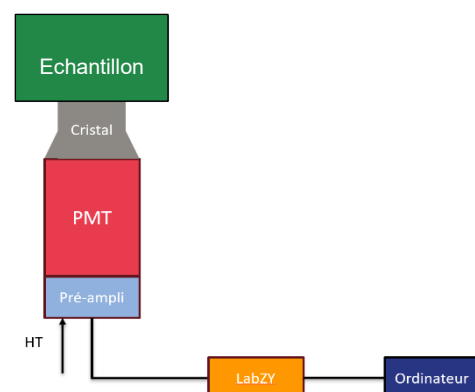


Figure 5 : Schéma de la chaîne d'acquisition

Le nanoMCA et le générateur de haute tension sont miniaturisés et sont donc adaptés au projet. L'acquisition des spectres est effectuée à l'aide du logiciel Labzy MCA 4.25. Les spectres sont ensuite traités à l'aide d'un logiciel développé à l'ASNR permettant d'utiliser un algorithme de démelange spectral.

3.2 - DEMELANGE SPECTRAL

Le démelange spectral est une technique consistant à décomposer un spectre en une somme de spectres individuels. Ces spectres individuels sont appelés signatures spectrales. Cette technique repose sur le théorème de Bayes. Une signature spectrale correspond au spectre de probabilité d'un radionucléide.

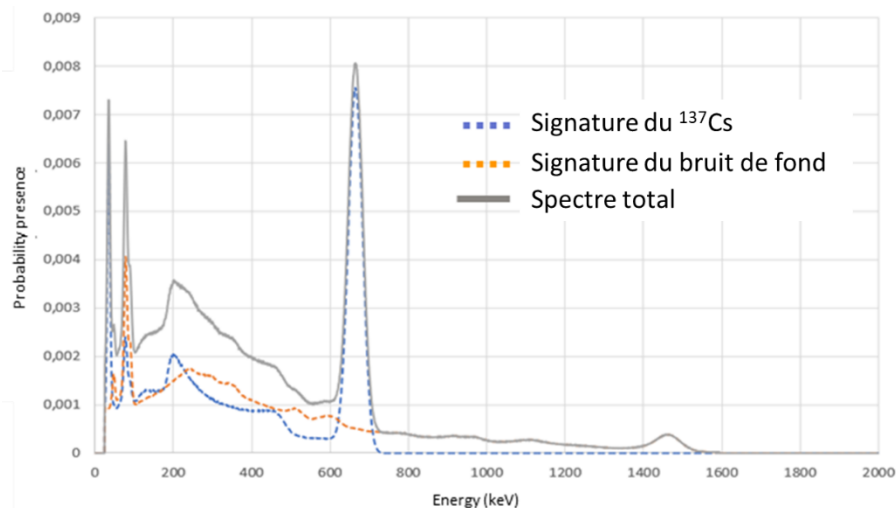


Figure 6 : Illustration du démelange spectral

Le démelange spectral nécessite donc une bibliothèque de spectres individuels afin de reconstituer le spectre total. Elle peut être construite à partir d'échantillons de référence ou par simulation Monte Carlo. La construction de signatures par simulation Monte Carlo impose une caractérisation parfaite du détecteur.

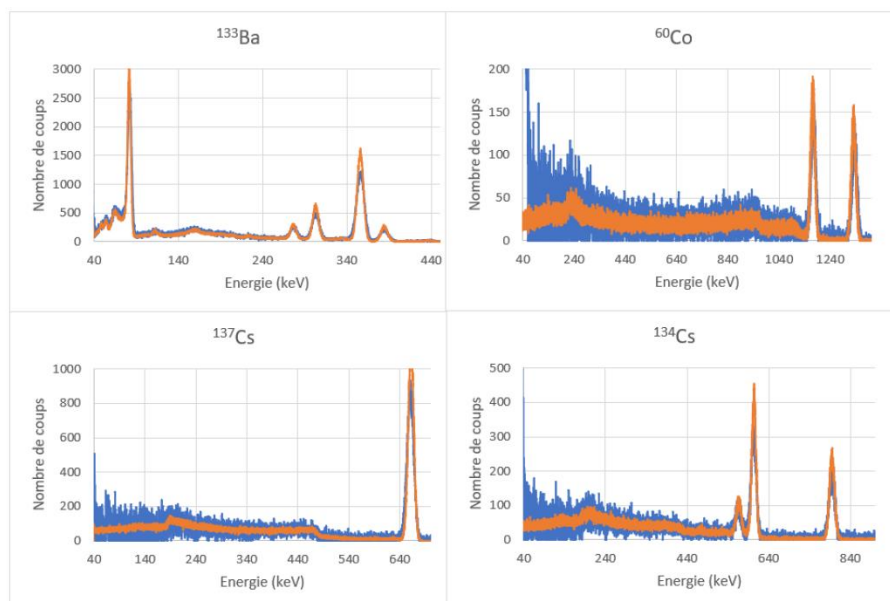


Figure 7 : Exemples de signatures spectrales obtenues par simulation (orange) ou par mesure d'échantillons de références (bleu) avec bruit de fond soustrait

3.3 - TRAITEMENT DU SPECTRE

Le traitement du spectre se fait à l'aide d'un logiciel « Tri-Latac » développé à l'ASNR. L'interface permet d'exploiter les données provenant de la chaîne d'acquisition au format Labzy. Afin de tirer pleinement parti des avantages du démelange spectral, le logiciel propose deux modes d'utilisation distincts : un mode « simplifié » et un mode « Expert ».

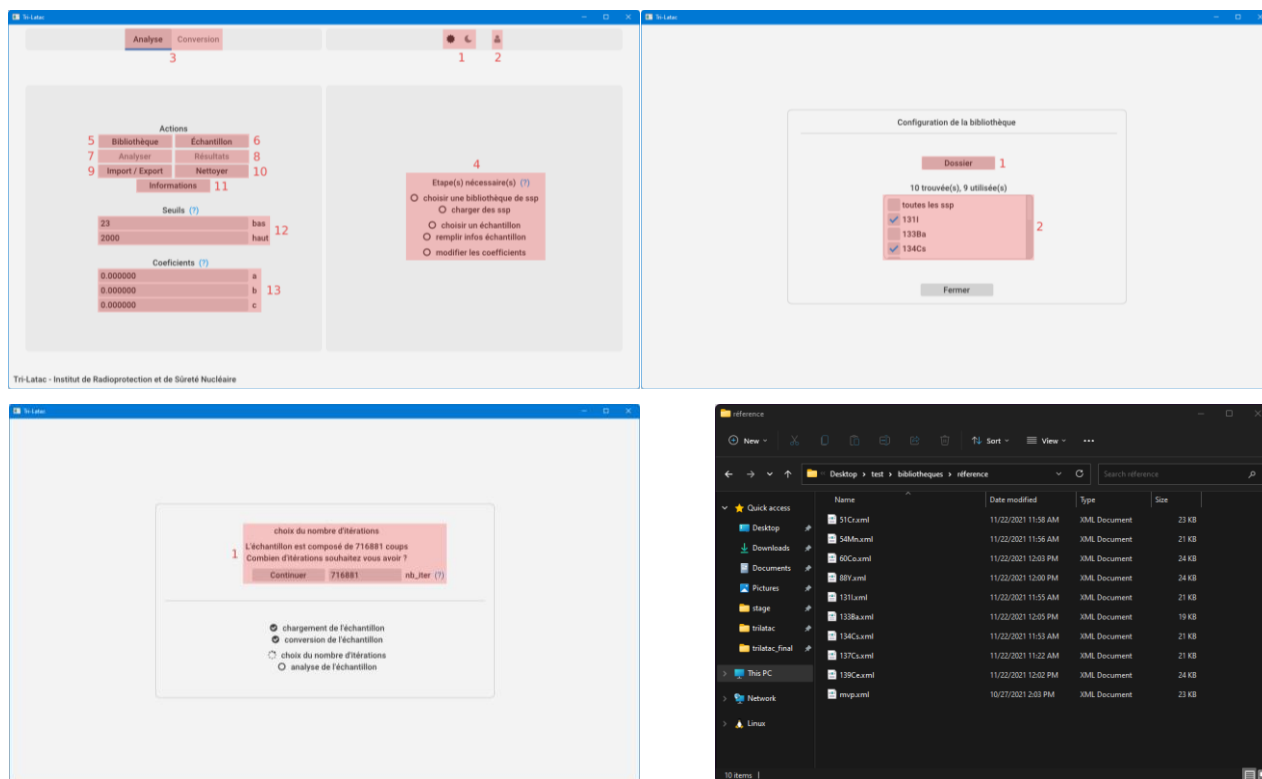


Figure 8 : Exemples de fenêtres du logiciel Tri-Latac du LMN

3.1.1 Mode Expert

Le mode expert donne accès à tous les paramètres de configuration et de visualisation. Il permet de configurer les paramètres d'étalonnage en énergie et la bibliothèque de signatures spectrales. Il permet de choisir les spectres à analyser et d'avoir les valeurs d'activité déterminées pour chaque radionucléide de la bibliothèque. De plus, ce mode offre une visualisation du spectre acquis et du spectre reconstitué à partir des proportions calculées par l'algorithme. Cela permet d'avoir une vérification visuelle de la qualité des résultats rendus.

Pour l'analyse par démelange spectral, il faut des signatures spectrales. Elles peuvent être créées en mode Expert à partir de n'importe quel spectre (depuis une simulation ou un spectre acquis avec soustraction de bruit de fond).

3.3.2 Mode simplifié

Le mode simplifié est celui destiné au public. L'utilisation est simplifiée et ne nécessite aucun paramétrage. Lorsqu'une analyse débute, l'utilisateur doit enregistrer des informations sur son échantillon : lieu de prélèvement, date, masse (g) et type d'échantillon.

Dans son fonctionnement actuel, le logiciel met en place une « surveillance » du dossier où est enregistré le spectre et l'analyse directement dès qu'il apparaît dans le dossier. Les résultats sont indiqués simplement

avec un message « rien à signaler » ou « présence de radioactivité ». L'utilisation se veut simple pour être accessible sans perdre l'efficacité du dispositif.

A ce jour, l'acquisition du spectre et son exploitation sont réalisés par deux logiciels distincts. **Le prototype final ne devra faire appel qu'à un seul et unique logiciel permettant une acquisition en mode simplifié.**

3.4 - ETUDE PREMILINAIRE

L'étude menée sur le prototype détenu au LMN visait à optimiser la mesure et à en définir les caractéristiques telles que le seuil de décision et la limite de détection, la justesse et les capacités d'identification de l'algorithme sur des échantillons réels et simulés à différents degrés de complexité. Les paragraphes ci-dessous doivent permettre au soumissionnaire de prendre connaissance des tests déjà menés au laboratoire sur le prototype actuel du LMN. Lorsque des performances sont données, celles-ci devront être atteinte par le prototype final.

3.4.1 Mesure d'échantillons réels et simulés

La fiabilité du système a été vérifiée en analysant des spectres simulés issus des mesures réalisées sur des prélèvements réalisés dans l'Est de la France sur des végétaux à la suite de l'accident de Tchernobyl en 1986, couvrant des cas de complexité croissante (jusqu'à 8 radionucléides artificiels simultanément). Les écarts relatifs observés entre les activités de référence et les mesures sont inférieurs à 5 % pour la majorité des radionucléides, avec des écarts plus importants pour ceux à faible activité ou proches en énergie (par exemple ^{106}Ru vs ^{134}Cs). Un exercice de crise en grandeur nature a également validé la robustesse et la réactivité du dispositif, avec une mise en service opérationnelle en moins d'une heure (installation, stabilisation en température, étalonnage et bruit de fond) et des écarts inférieurs à 10 % sur les activités mesurées. Ces performances sont permises par la combinaison de l'algorithme et du choix du détecteur LaBr_3 . Dans toutes les situations testées, l'algorithme permet de différencier les radionucléides d'énergies proches et malgré une bibliothèque de signature conséquente, aucun faux positif ou omission n'a été décelé.

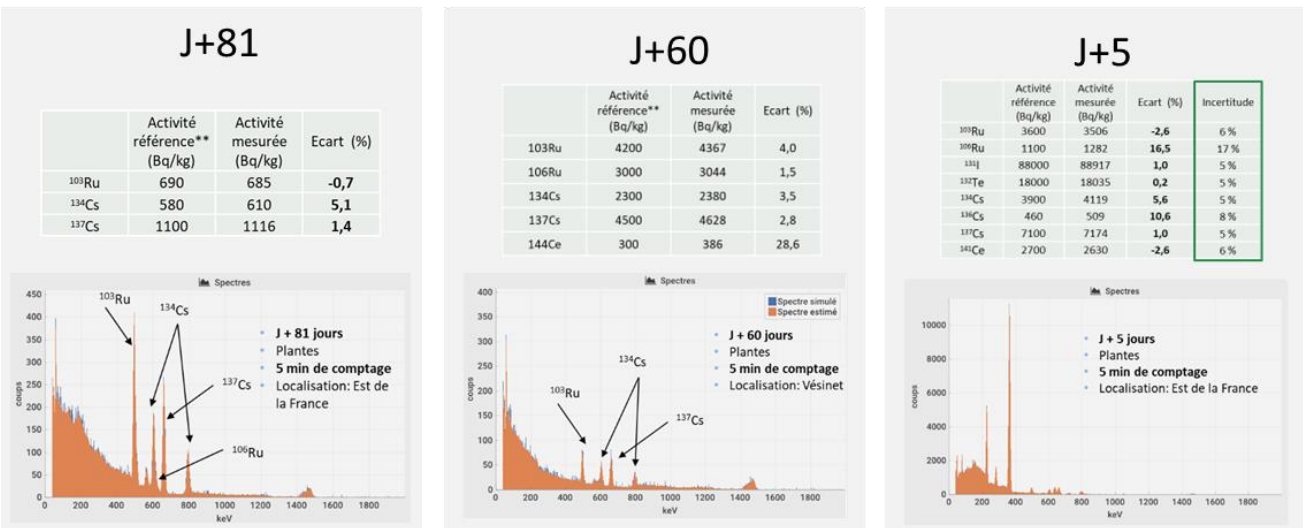


Figure 9 : Reconstitution de spectres à partir d'échantillons prélevés en France² en 1986 après l'accident de Tchernobyl, à différents temps après les rejets (données ASN, toute utilisation des données est interdite sans autorisation préalable explicite de l'ASN)

² Base de donnée ArcEnv

3.4.2 Incertitudes de mesure

L'analyse des incertitudes a montré que, pour des radionucléides bien identifiés, l'incertitude totale est de l'ordre de 6 %, mais peut atteindre 20 % pour des radionucléides faiblement présents ou masqués par le fond Compton, même pour des activités inférieures aux NMA. Pour garantir la qualité des résultats en toute situation, il a été décidé d'appliquer systématiquement une incertitude globale de 20 %.

Tableau 2 : Exemple d'incertitudes obtenus sur un spectre complexe issu d'un prélèvement de l'Est de la France de mai 1986 reconstitué à l'aide de (données ASNR, toute utilisation des données est interdite sans autorisation préalable explicite de l'ASNR)

RN	Activité mesurée (Bq/kg)	Incertitude
¹⁰³ Ru	3506	6 %
¹⁰⁶ Ru	1282	17 %
¹³¹ I	88917	5 %
¹³² Te	18035	5 %
¹³⁴ Cs	4119	5 %
¹³⁶ Cs	509	8 %
¹³⁷ Cs	7174	5 %
¹⁴¹ Ce	2630	6 %

3.4.3 Seuil de décision et limite de détection

Pour déterminer les seuils de décision, il n'est pas possible d'utiliser les calculs définis dans la norme NF ISO 11929 qui ne fonctionnent pas avec le démélange spectral. Une autre méthode a été mise en œuvre. Pour cela, des mesures de bruit de fond à différents temps de comptage ont été analysées 1000 fois chacune. Avec un risque $\alpha = 2,5 \%$, la 25^{ème} proportion la plus haute correspond à la valeur de seuil de décision pour le bruit de fond analysé. Les seuils de décision ont ainsi été déterminés en considérant un SG500 rempli d'eau avec la présence d'un seul radionucléide. Dans notre cas, la limite de détection correspond à 2 fois le seuil de décision.

Tableau 3 : Limites de détection en Bq/kg pour un SG500 et une densité 1 (équivalent eau)

Temps de comptage	¹³¹ I	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
15 s	206	205	339
30 s	146	145	240
60 s	103	103	170
300 s	46	46	76

Le prototype actuel permet d'atteindre les NMA en iode et césium 137 en 30 secondes de comptage. Afin de prendre en compte les fluctuations du bruit de fond, le temps de comptage a été fixé à 5 minutes pour être sûr d'atteindre les NMA à chaque mesure.

Tableau 4 : temps nécessaire pour atteindre les NMA

Matrice	Densité	¹³¹ I	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
Eau	1	23 s	3,1 s	3,4 s
Sol	1,3	13 s	1,8 s	1,8 s
Végétaux	0,3	280 s	39 s	39

3.4.4 Optimisation mécanique

Le prototype actuel est équipé d'un blindage au plomb et d'une épaisseur d'un centimètre d'acier (Figure 1). L'étude préliminaire a montré que celui-ci n'est pas essentiel pour le niveau de performance attendu dans des conditions normales d'utilisation. Il n'est donc pas nécessaire de reprendre ce type de blindage pour un prototype final. Un carter dans un matériau léger, type plastique rigide, suffit. Cette optimisation a également eu but de rendre le prototype moins coûteux et plus mobile en réduisant son poids. Ce paramètre devra être pris en compte dans la conception du prototype final.

3.4.5 Recalage en énergie

La sensibilité du cristal aux variations de température nécessite l'implémentation d'une correction automatique du gain. L'algorithme de démixage spectral commence à 40 keV pour éviter les interférences avec les raies X du ^{138}La présent dans le cristal. Les pics caractéristiques du ^{138}La peuvent par ailleurs être utilisés pour recalibrer le spectre en énergie et réaliser la correction. Sans cela, le prototype sera inutilisable en dehors du lieu dans lequel le détecteur a été étalonné. Le recalage en énergie n'a pas été intégré au logiciel de traitement mais l'algorithme a été développé et sera accessible au prestataire.

3.4.6 Etude des résidus

Lors du traitement par démixage spectral, l'algorithme fournit deux spectres en sortie (Figure 10) : le spectre mesuré (spectre simulé sur la figure) et le spectre calculé avec les proportions estimées (spectre estimé) par l'algorithme. Si un radionucléide manque dans la bibliothèque de signatures spectrales, les deux spectres ne se superposent pas correctement. Ce problème doit être identifié lors du traitement. Une méthode permettant de signaler à l'utilisateur la présence d'un, ou plusieurs radionucléides inconnu(s) doit être mise en place. Une méthode testée se fonde sur les résidus.

Le spectre estimé par l'algorithme doit être déduit du spectre à analyser pour obtenir les résidus. En analysant le spectre de résidus sur chaque canal, l'algorithme est capable de signaler un nombre de coups dépassant un certain seuil. Cette fonctionnalité a été ajoutée au logiciel développé au LMN et devra être présente dans le prototype final. Le prestataire pourra proposer une meilleure version du calcul des résidus tels que c'est actuellement fait sur notre logiciel.

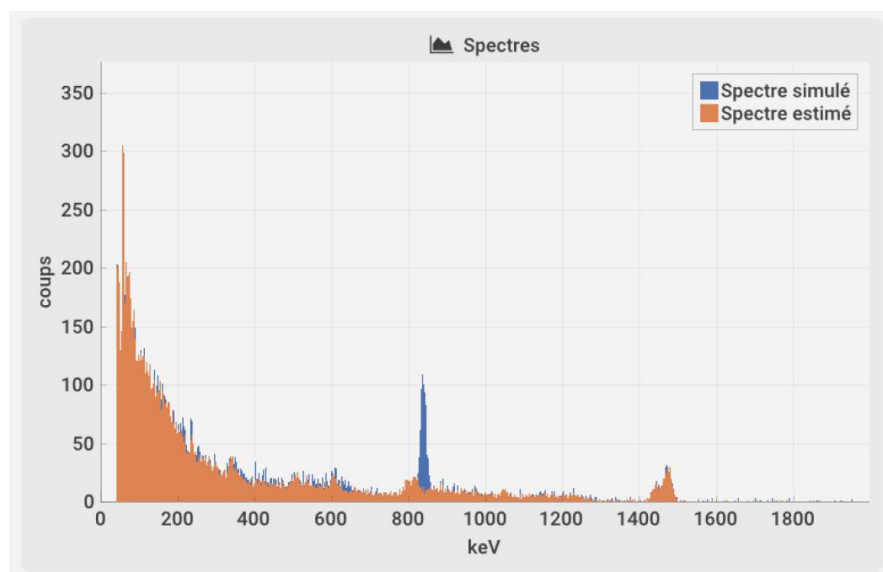


Figure 10 : Exemple du spectre simulé et estimé obtenu par démixage spectral

3.4.7 Densité de l'échantillon

La nature des échantillons peut varier (eau, viande, végétal ou encore sol). Des simulations de différentes matrices ont été effectuées. Il a été observé que, pour une même densité et un même radionucléide, un spectre similaire est obtenu pour chaque matrice malgré une composition différente³. Il est donc possible de ne simuler qu'une seule matrice « générique » à une densité donnée. De plus, l'autre paramètre déterminant pour obtenir un résultat le plus juste possible est la hauteur de remplissage du contenant.

Lorsque la densité augmente, le rendement sur le pic d'absorption totale baisse et le fond Compton augmente. Il est donc nécessaire de réaliser une correction en fonction de la densité. La conclusion de l'étude préliminaire est d'inclure une pesée de l'échantillon au prototype final et de sélectionner la classe de l'échantillon, i.e. une densité (eau, lait, légume feuille, Légumineux, viande, etc..) afin de déterminer un volume apparent de l'échantillon et ainsi de sélectionner la bonne bibliothèque de signatures spectrales pour l'analyse de l'échantillon, en fonction de la densité.

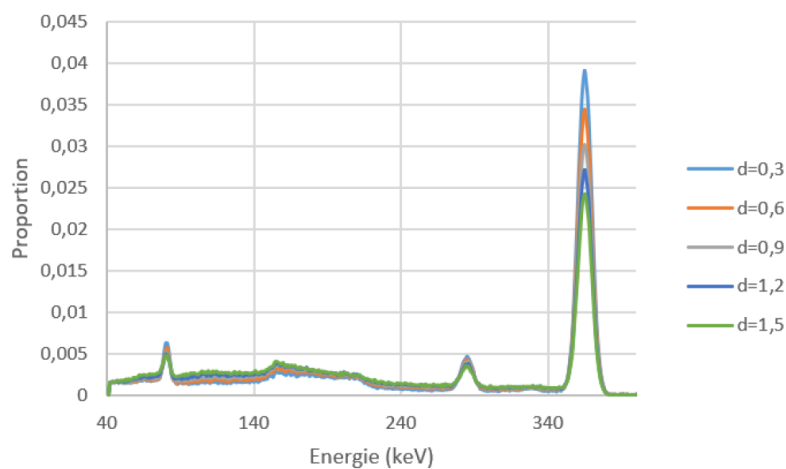


Figure 11 : Exemple de spectres d'¹³¹I pour une matrice à différentes densités

3.5 - CONCLUSION DE L'ETUDE PRELIMINAIRE

Grâce à l'étude préliminaire, le système conçu par le LMN répond aux caractéristiques suivantes.

- Utilisation d'un détecteur LaBr₃ et d'une électronique type Labzy,
- Traitement du spectre par démélange spectral,
- Atteinte des NMA en moins pour 5 minutes de comptage,
- Incertitudes de l'ordre de 5% à k=2 pour 5 minutes de comptage,
- Excellentes performances d'identification et de quantification sur des échantillons complexes,
- Nécessité d'avoir une balance intégrée pour peser les échantillons et estimer une densité apparente,
- Bibliothèques de signatures spectrales à densités variables à intégrer,
- Nécessité d'avoir un recalage en énergie en raison de la sensibilité du détecteur à la température.

Le prototype final devra reprendre ces caractéristiques. Les caractéristiques techniques sont détaillées dans la partie ARTICLE - 4.

³ Les écarts observés ne sont pas significativement impactant compte tenu du travail que nécessiterai la simulation de toutes les matrices, densités et radionucléides.

ARTICLE - 4 CARACTERISTIQUES TECHNIQUES

4.1 - CHAÎNE D'ACQUISITION

Le prototype final devra inclure :

- Un scintillateur inorganique $\text{LaBr}_3(\text{Ce}+\text{Sr})$ de dimension 1,5"x 1,5" couplé à un tube photomultiplicateur (PMT) 2"x 2" type Luxium 38S38/2 ou équivalent. L'ensemble cristal/PMT sera équipé de 14 pins pour le branchement du préamplificateur ;
- Un préamplificateur type Luxium AS20 ou équivalent compatible avec l'ensemble détecteur/PMT ;
- Un générateur haute tension adapté au détecteur et au préamplificateur ;
- Un analyseur multicanal (MCA) type nanoMCA de LabZY ou équivalent.

L'ensemble devra être utilisable sur un réseau électrique domestique.

Remarques : le prestataire devra reprendre les composants du prototype actuel qui lui seront fournis (chaîne d'acquisition complète décrite au paragraphe 3.1 -) ou proposer une solution alternative équivalente. La solution la plus avantageuse économiquement sera privilégiée. En cas de détérioration du matériel mis à disposition, lorsque celle-ci est imputable au prestataire, ce dernier devra, à ses frais, fournir une solution de remplacement équivalente. En raison de la difficulté d'approvisionnement du Labzy, le prestataire utilisera le matériel à disposition à l'ASNR. Dans ce cas, le prestataire devra proposer en complément une solution alternative dans un rapport joint au projet, permettant de chiffrer le remplacement du Labzy pour de futurs projets.

4.2 - CARTER DE PROTECTION

Il faudra réaliser un carter de protection pour l'ensemble de la chaîne d'acquisition. Cette enceinte devra être légère et robuste pour rester facilement transportable et étanche pour le travail en dehors du laboratoire. La pré-étude a montré qu'un blindage acier ou plomb n'est pas nécessaire. Un carter léger, imprimé en 3D par exemple, pourra être envisager afin de réduire le poids et le cout de l'enceinte de protection.

Le prototype devra intégrer une système de pesée pour les échantillons. La résolution pourra être de 0,1 g à 1 g. Le capteur devra être intégré au système. Le système devra permettre de réaliser la mesure directement après la pesée sans avoir à retirer l'échantillon de l'enceinte. Le PC pourra être intégré ou déporté (variante). Il devra permettre une prise de contrôle ergonomique en mode simplifié et expert. L'enceinte devra posséder un système pour éviter la surchauffe du matériel, typiquement un ventilateur afin de dégager les calories produites par les composants.

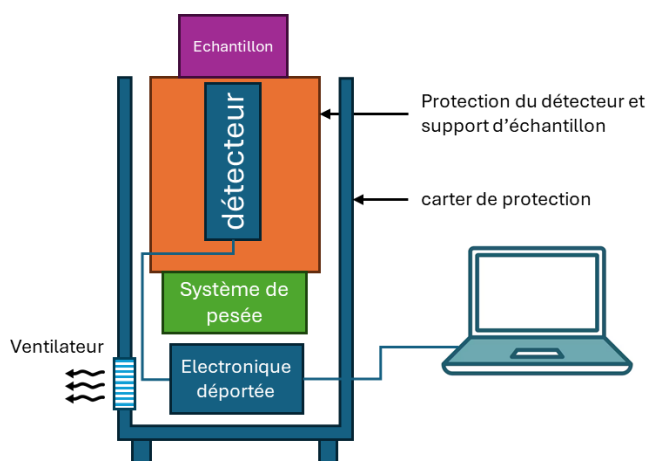


Figure 12 : schéma de principe

Il faut à minima que le support d'échantillon puisse accueillir des contenants de type SG500 (voir photo ci-dessous) dont les dimensions sont données en annexe. Ces contenants permettront de réaliser la calibration du détecteur. Un système de centrage simple permettra de les positionner au centre, au-dessus du détecteur. Le support d'échantillon devra être adapté à tous types de denrées : viande, légumes (légumineuses, feuilles), liquides, etc., et permettre leur protection pendant la mesure. Le prestataire intégrera une solution dans son concept, qui devra être validée par l'ASNR avant toute fabrication. Cette solution pourra reposer sur un support existant du commerce (type conteneur alimentaire domestique), sous réserve d'adaptations répondant à nos besoins spécifiques. L'utilisateur final pourra utiliser une protection type sachet zip, sans incident notable sur le résultat.

Pour rappel, l'activité massique est calculée à partir des signatures sélectionnées en fonction de la masse de de la densité des échantillons.



Figure 13 : SG500

4.3 - LOGICIEL D'ACQUISITION ET DE TRAITEMENT DES SPECTRES

Le logiciel actuel ne répond pas à tous les besoins pour le prototype final car il est constitué de deux éléments :

- Le logiciel d'acquisition
- Le logiciel de traitement.

Il sera nécessaire de proposer un logiciel de pilotage tout intégré permettant de réaliser l'acquisition et le traitement du spectre à l'aide du démélange spectral dans un mode expert et un mode simplifié. Le prestataire aura accès au code source de l'application actuelle. Les fonctionnalités à intégrer dans chacun des modes sont résumées ci-dessous.

4.3.1 Fonctionnalités du mode expert

- Accès au paramétrage du mode simplifié :
 - Attribution des signatures à une famille de densité pour le traitement automatique en mode simplifié
 - Recalage en énergie du spectre en utilisant la radioactivité intrinsèque du cristal LaBr₃ et analyse par démélange spectral d'un spectre avec calcul des proportions et activités liées aux signatures spectrales
 - Configuration des paramètres d'étalonnage en rendement du détecteur
 - Réglage du nombre d'itération

- Réglage du temps de comptage
- Réglage de la fréquence d'acquisition du bruit de fond
- Paramétrage des NMA pour le mode simplifié
- Paramétrage et utilisation du mode expert :
 - Protection du mode expert par un mot de passe
 - Configuration des paramètres d'étalonnage en rendement du détecteur
 - Identification de l'échantillon à mesurer en mode expert (identifiant, date de prélèvement, masse (g ou kg), volume (L ou mL), unité de restitution)
 - Acquisition du spectre d'un échantillon
 - Acquisition du spectre de bruit de fond
 - Conversion d'un spectre en signature spectrale : le bruit de fond du spectre transformé doit être déduit, cela nécessite de pouvoir sélectionner le bruit de fond à soustraire. A noter que la transformation d'un bruit de fond en signature spectrale n'a pas besoin d'une soustraction de bruit de fond.
 - Import et conversion d'un spectre externe en signature spectrale (par exemple spectre simulé)
 - Recalage en énergie du spectre en utilisant la radioactivité intrinsèque du cristal LaBr₃ et analyse par démixage spectral d'un spectre avec calcul des proportions et activités liées aux signatures spectrales
 - Visualisation du spectre acquis et du spectre reconstitué à partir des proportions calculées par l'algorithme.
 - Calcul et affichage des résidus entre le spectre acquis et reconstitué.

Le logigramme ci-dessous résume les différents écrans nécessaires. Le prestataire pourra proposer des écrans supplémentaires ou en retirer s'il ne les juge pas pertinents. La majorité des écrans existent déjà dans l'application développée au LMN, exceptée l'acquisition du spectre :

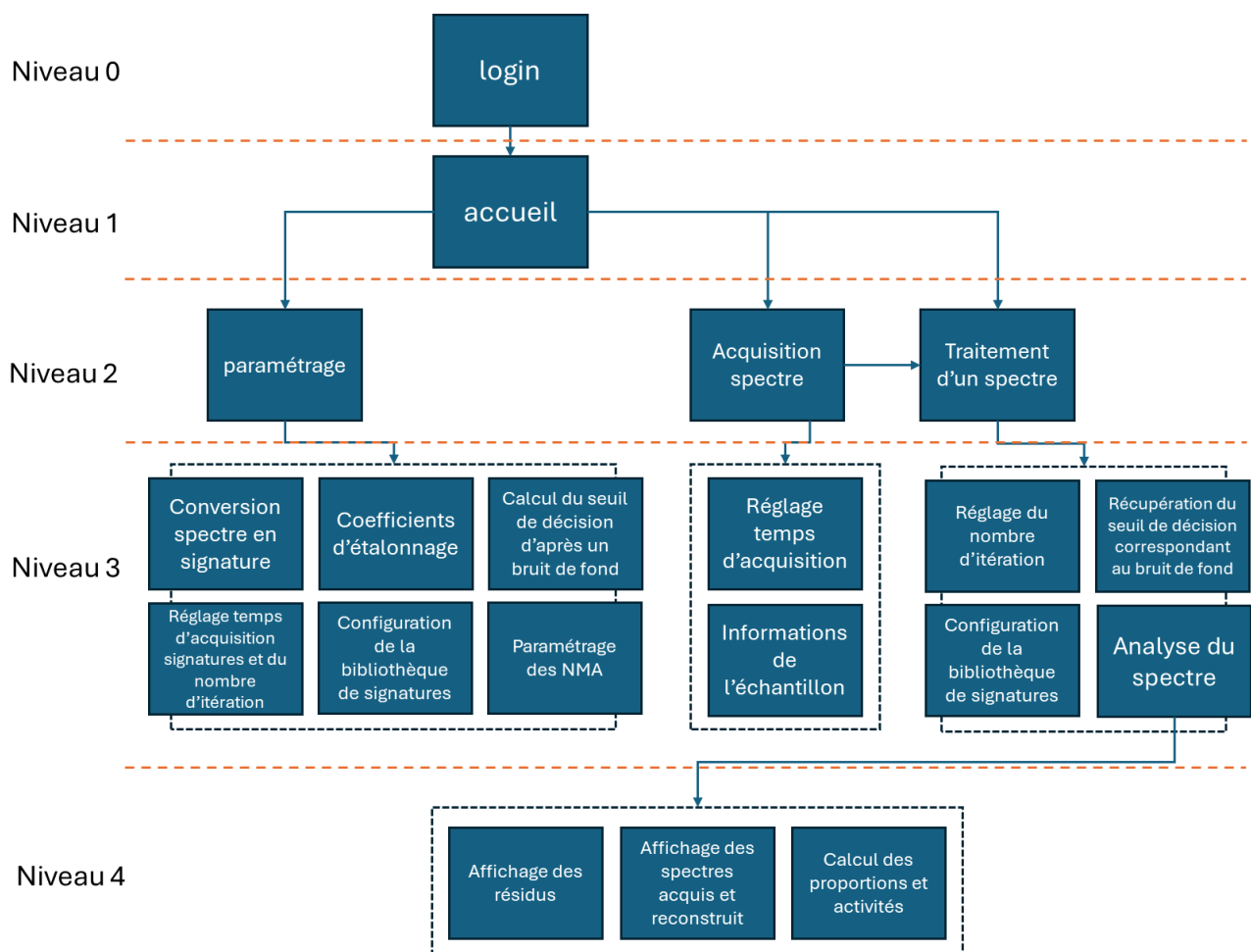


Figure 14 : Logigramme du logiciel du tri-latac en mode expert

Ecrans du mode expert :

- Niveau 0 :
 - Ecran Login : connexion à l'aide d'un identifiant et mot de passe au mode expert
- Niveau 1 :
 - Ecran Accueil : permet d'accéder aux écrans de niveau 2
- Niveau 2 :
 - Ecran Paramétrage : paramétrage de l'acquisition et des bibliothèques de signatures spectrales. Accès aux écrans de niveau 3.
 - Conversion spectre en signature : permet de convertir d'importe quel spectre en signature spectrale en lui attribuant un identifiant lié au radionucléide, la géométrie et à la densité de l'échantillon
 - Coefficient d'étalonnage : permet d'enregistrer les coefficients d'étalonnage en rendement du détecteur pour le mode expert et simplifié
 - Configuration de la bibliothèque : permet de masquer ou de rendre visible des signatures pour leur utilisation en mode simplifié et lors de l'analyse. Le bruit de fond est une signature à part entière et doit être identifiable en tant que bruit de fond. Le bruit de fond est utilisé pour calculer le seuil de décision.
 - Calcul du seuil de décision : permet en amont d'une exploitation de déterminer les valeurs de seuil de décision pour les signatures spectrales utilisées.
 - Réglage temps d'acquisition : permet de régler le temps d'acquisition et le nombre d'itération pour la mesure pour le mode simplifié
 - Paramétrage des NMA : permet de définir les valeurs de niveaux admissibles selon le règlement Euratom ou d'indiquer une valeur manuellement différente des NMA.
 - Acquisition spectre : permet l'acquisition du spectre d'un échantillon ou d'un bruit de fond. Accès aux écrans de niveau 3 et accès direct au traitement du spectre après acquisition
 - Réglage du temps d'acquisition : Réglage du temps d'acquisition de l'échantillon ;
 - Information de l'échantillon : enregistrement des informations de l'échantillon (masse, volume, date de prélèvement, identifiant, ...)
 - Traitement du spectre : permet de faire l'analyse par démixage spectral après sélection des paramètres. Accès aux écrans de niveau 3.
 - Réglage du nombre d'itérations : permet de régler le nombre d'itération de l'algorithme.
 - Configuration de la bibliothèque de signature : permet de sélectionner les signatures à utiliser.
 - Analyse du spectre : bouton permettant de lancer l'algorithme et d'afficher les écrans de niveau 4
 - Récupération du SD en fonction du bruit de fond utilisé comme signature spectrale. Permettra de comparer l'activité calculée et la comparer au seuil de décision.
- Niveau 4 :
 - Affichage des résidus : permet d'afficher les résidus entre spectre simulé et spectre acquis.
 - Affichage des spectres : affiche les spectres mesuré et reconstruit à partir de l'algorithme.
 - Calcul des proportions et activité : permet d'afficher les proportions de chaque signature et l'activité équivalent en Bq ou Bq/kg. Affiche du seuil de décision lorsque les activités sont inférieures à celui-ci. Si aucun seuil de décision n'a été paramétré, affiche de SD : « Manquant ».

4.3.2 Fonctionnalités du mode simplifié

- Sélection de la classe de l'échantillon (lait, eau, viande, légume, aliment pour nourrisson) et du contenant.
- Pesée automatique
- Mesure d'un échantillon selon les paramètres définis en mode expert (coefficients d'étalonnage et temps d'acquisition)
- Réalisation automatique du traitement par démélange spectral après acquisition, selon les paramètres définis en mode expert (nombre d'itération et bibliothèque spectrale).
- Affichage d'un résultat simplifié « OK » ou « NON OK » en fonction des activités gamma comparées aux NMA pour les différentes classes d'échantillon. Les NMA sont définies dans le paramétrage en mode expert. Elles peuvent suivre la directive Euratom ou être définie manuellement par l'opérateur si les niveaux à ne pas dépasser sont différentes des NMA. En cas de positif, l'information doit être stockée dans un fichier log accessible à l'expert. Ce log doit contenir les informations sur l'activités en radiocléides détectés et le pourcentage d'excès par rapport aux niveaux définis. Ce log peut par exemple être accessible via une icône ⓘ située à côté de la réponse.

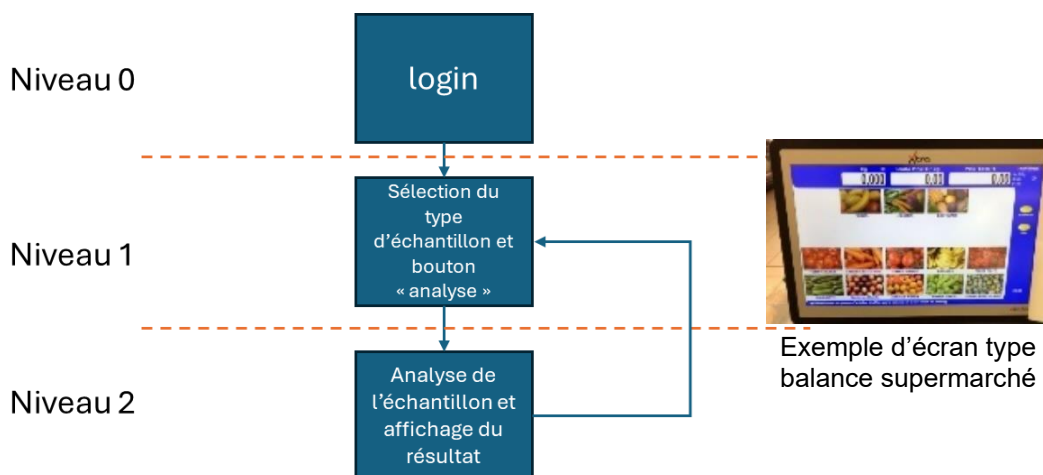


Figure 15 : Logigramme du logiciel du tri-latac en mode simplifié

Un minuteur permettra de voir le temps de mesure restant

Les différentes classes d'échantillons seront :

- Viande
- Poisson
- Crustacés, mollusques
- Légumineuses-feuilles (salade, épinards)
- Légumes-racines (carottes, pommes de terre)
- Légumes secs (pois chiche, lentilles)
- Fruits
- Céréales (riz, blé, maïs)
- Liquide (eau, lait)
- Fromages, yaourts
- Lait infantile

L'ASNR aura la charge de réaliser les signatures spectrales correspondant à différents niveaux de remplissage pour chacune des classes.

Ecrans du mode simplifié :

- Niveau 0 :

- Ecran Login : connexion à l'aide d'un identifiant et mot de passe au mode simplifié
- Niveau 1 :
 - Sélection de la classe : à l'instar d'un écran de sélection de balance en libre-service en supermarché, l'opérateur peut choisir parmi plusieurs classes telles que liquide alimentaire, viande, aliment pour nourrisson, céréales ou légume. Connaissant la masse et la densité des échantillons, cela permet de calculer un volume de remplissage apparent et de faire correspondre la mesure à la bibliothèque adéquate pour le traitement par démelange spectral. Permet, grâce à un bouton « démarrer », de lancer la mesure.
- Niveau 2 :
 - Pesée de l'échantillon et analyse du spectre automatique, sans intervention humaine, en tâche de fond et affichage du résultat sous la forme « OK » ou « NON OK » en fonction des activités gamma comparées aux niveaux (NMA ou défini par le mode expert) pour les différentes classes d'échantillon.

4.4 - ALGORITHME DE DEMELANGE SPECTRAL

L'algorithme a été codé en C++ et Python. L'algorithme de démelange spectral sera fourni par l'ASNR. Le code source du logiciel actuel sera également mis à disposition. Des signatures spectrales de référence seront fournies pour pouvoir faire des tests complets.

4.5 - VARIATION DE LA TEMPERATURE

Le gain d'une chaîne d'acquisition varie en fonction de la température c'est-à-dire, l'énergie associée à un canal va varier en fonction de la température du détecteur. Un étalonnage en énergie n'est donc valable que pour une gamme de température donnée. La gestion du décalage lié à la température est primordiale car cela dégrade la qualité des résultats rendus.

La solution sera d'identifier les pics du ^{138}La du détecteur (radioactivité intrinsèque du détecteur = bruit de fond) dans le spectre et de le recalculer, connaissant l'énergie à laquelle ils se situent. Il peut être pertinent de vérifier la justesse du recalage avec cette méthode. Un algorithme de recalage a également été développé par l'ASNR et sera mis à disposition. Une vérification de la température à fréquence régulière permettra de faire le recalage en énergie si nécessaire. Cela pourra s'effectuer avant chaque exploitation manuelle ou automatique du spectre.

4.6 - SEQUENCES D'ANALYSE

Les séquences d'analyses types sont décrites ci-après pour les deux modes de fonctionnement.

4.6.1 Mode expert

- a) Bruit de fond de l'équipement*
- b) Positionnement de l'échantillon
- c) Enregistrement des informations, dont géométrie et masse
- d) Acquisition du spectre
- e) Sélection des paramètres de traitement du spectre dont : nombre d'itération, bibliothèque de signatures.
- f) Affichage des spectres simulés et acquis, avec accès aux résidus et calculs d'activité.
- g) Export des résultats au format txt ou csv (résultats + spectres + informations sur les échantillons)

4.6.2 Mode simplifié

- a) Bruit de fond de l'équipement*
- b) Positionnement de l'échantillon
- c) Sélection de la classe d'échantillon et du type de contenant

- d) Acquisition, traitement automatique du spectre en fonction de la classe/contenant
- e) Affichage du résultat « OK » ou « NOK » par comparaison aux niveaux maximaux définis dans les paramètres.

* le bruit de fond n'est pas nécessairement effectué avant chaque analyse. Le mode simplifié doit imposer un bruit de fond systématique à intervalle régulier (à paramétrer en mode expert). Le bruit de fond étant une signature spectrale à part entière, il doit être intégré à la bibliothèque automatiquement. Le mode expert ne nécessite pas de traitement automatique, l'opérateur étant suffisamment expérimenté pour le faire manuellement.

Toutes les opérations liées à l'analyse des échantillons en mode expert et simplifié devront être enregistrées dans un fichier log.

4.7 - ALIMENTATION ELECTRIQUE

Le prototype devra être alimenté en 230 V, 50 Hz via une fiche unique de type E permettant d'alimenter tous les composants, balance / capteur de poids compris, et fonctionner de manière fiable sur un réseau électrique domestique standard, sans nécessiter d'infrastructure spécifique ou de conditionnement de puissance particulier. Il devra également intégrer les protections nécessaires contre les surtensions, les microcoupures et les perturbations électromagnétiques courantes sur ce type de réseau.

ARTICLE - 5 PERFORMANCES ANALYTIQUES

Les rendements cibles de détection des radionucléides pour les différentes géométries d'échantillons de densité 1 (équivalent eau) sont indiqués dans le Tableau 5. Ces rendements ont été obtenus sur le détecteur décrit au paragraphe 3.1 - avec une mesure au contact, centrée sur le détecteur.

Tableau 5 : Rendements selon les géométries

RN	380	SG500	M20
¹⁴⁰ Ba	0,014	0,011	0,008
¹⁴¹ Ce	0,024	0,020	0,014
¹⁴⁴ Ce	0,0065	0,0054	0,0038
¹³⁴ Cs	0,062	0,051	0,038
¹³⁷ Cs	0,025	0,020	0,015
¹³¹ I	0,036	0,029	0,022
¹⁰⁶ Rh	0,012	0,001	0,007
¹⁰³ Ru	0,031	0,026	0,019
¹³² Te	0,045	0,036	0,026
¹³⁶ Cs	0,081	0,067	0,049

Les seuils de décision (SD) et limites de détection (LD) obtenus avec le dispositif sont présentés dans le Tableau 6 pour les trois radionucléides d'intérêt.

Tableau 6 : Seuil de décision et limites de détection pour un échantillon de densité 1 (équivalent eau) en SG500 pour 5 minutes de comptage

RN	Activité (Bq/kg)	
	SD	LD
¹³¹ I	21	46
¹³⁴ Cs	22	46
¹³⁷ Cs	29	76

ARTICLE - 6 ESSAIS SUR SITE

Avant la mise en service définitive, le prototype de détecteur fera l'objet d'essais complets sur site ASNR afin de valider son bon fonctionnement, sa conformité aux spécifications techniques et sa robustesse. Ces essais incluront :

- contrôle du rendement en ¹³⁷Cs pour la géométrie SG500 pour une densité 1 (équivalent eau);
- vérification de l'algorithme de démelange spectral par comparaison avec le système actuel et sur des échantillons réels :
 - vérification de la justesse,
 - vérification du seuil de décision,
 - atteinte des NMA en 5 minutes de comptage pour l'¹³¹I, le ¹³⁷Cs et ¹³⁴Cs,
- vérification de la prise en compte des bibliothèques en fonction de la densité apparente des échantillons ;
- recalage en énergie lié à la stabilité en température ;
- validation du mode simplifié selon les spécifications du paragraphe 4.3 - ;
- validation du mode expert selon les spécifications du paragraphe 4.3 - ;

Une fois ces tests validés, ils permettront d'évaluer les performances du détecteur et du logiciel associé en environnement opérationnel et de détecter d'éventuels écarts ou besoins d'adaptation. Les résultats de cette phase d'essai seront documentés dans un rapport de validation par l'ASNR avant acceptation finale.

ARTICLE - 7 FORMATION DES UTILISATEURS

La formation à l'utilisation et à la maintenance de l'équipement ainsi qu'à l'utilisation du logiciel sera prévue pour 3 personnes au moment de l'installation de l'équipement.

ARTICLE - 8 JALONS

Le prestataire s'engagera à proposer, dans son offre, un planning détaillé dont la durée totale n'excédera pas douze (12) mois à compter de la date de notification du marché. Ce planning devra intégrer obligatoirement les jalons suivants :

- validation définitive du planning par le maître d'ouvrage ;
- validation des composants ;
- revue de conception et validation de la maquette 3D ;
- lancement des approvisionnements ;
- assemblage et montage du prototype ;
- réalisation de la recette usine ;
- livraison du prototype sur site ASNR et démarrage des essais fonctionnels en conditions réelles ;
- validation des performances ;
- validation finale du logiciel embarqué ou associé ;
- remise complète de la documentation technique et des fichiers sources.

Une réunion de suivi entre le soumissionnaire et l'ANSR aura lieu *a minima* toutes les 3 semaines.

Le prestataire devra également joindre à son offre un échéancier de paiement, construit sur la base de ces jalons, et précisant les modalités de facturation et de libération des paiements à l'issue de chaque étape validée.

ARTICLE - 9 LIVRAISON ET INSTALLATION

Lieu de livraison :
ASNR

Service d'analyses et de métrologie de l'environnement
31 rue de l'écluse – 78116 Le Vésinet

L'équipement devra être livré, installé et mis en service au plus tard dans un délai d'un an à compter de la date de notification du marché, et au plus tard le 30/11/2026.

Déballage, vérification fonctionnelle initiale et support à la prise en main attendus

ARTICLE - 10 LIVRABLES

10.1 - LIVRABLES MATERIELS

La livraison comprendra le prototype final, tous ses composants et le logiciel

La fourniture d'un PC informatique permettant de piloter le prototype sera décidée lors de la signature du présent marché, (offre de base ou variante facultative), l'ASNR étant en mesure d'utiliser son propre matériel informatique.

Le prestataire indiquera dans son offre technique les spécifications minimales du PC sur lequel installer le logiciel.

10.2 - LIVRABLES DOCUMENTAIRES

Les livrables documentaires sont les suivants :

- planning du projet ;
- maquette 3D au format STEP ;
- la liste complète de tous les composants du prototype et les plans d'assemblage ;
- les fiches techniques de tous les composants de la chaîne de mesure⁴ et de la balance ou du capteur de poids ;
- notice d'utilisation du prototype ;
- code source de l'application et tout programme nécessaire au fonctionnement du prototype (programmation d'un automate, dll, etc..) ;
- recette usine ;
- chiffrage d'une solution alternative au Labzy, le cas échéant.

ARTICLE - 11 PROPRIETE INDUSTRIELLE

L'ensemble des études, conceptions, développements, prototypes, documents techniques, plans, fichiers, résultats de mesures ou d'analyses, ainsi que tout élément matériel ou immatériel réalisé dans le cadre de la présente prestation, demeure la propriété exclusive de l'ASNR, y compris les droits de propriété intellectuelle afférents. Aucun droit d'usage, de reproduction, de diffusion ou d'exploitation, même partiel, ne pourra être revendiqué par le prestataire en dehors de l'exécution du marché, **sauf autorisation écrite préalable de l'ASNR.**

⁴ La caractérisation du détecteur sera réalisée par le LMN à réception du prototype

ARTICLE - 12 GARANTIE

12.1 - DUREE ET PERIMETRE DE LA GARANTIE

La garantie sera d'une durée minimale de douze (12) mois à compter de la réception de l'équipement avec une couverture complète (matériel, logiciel, pièces, main d'œuvre)

Le titulaire garantit le bon fonctionnement de l'ensemble du matériel et logiciels conformément aux spécifications techniques à compter de la date de réception finale de la prestation et pour la période précisée dans son offre.

Le titulaire sera le seul interlocuteur du laboratoire. Dans le cas où l'équipement serait constitué de matériel d'origines diverses, le titulaire s'engage sur une garantie totale des matériels nécessaires au fonctionnement optimal de l'équipement et la fourniture des pièces détachées de tous les matériels vendus.

Tout délai de réparation ou de dysfonctionnement bloquant, le cas échéant prolonge d'autant la période de garantie.

12.2 - DELAIS D'INTERVENTION

Le délai d'intervention à distance sera de 48 h maximum, même pendant la période couverte par la garantie.

Le délai d'intervention sur site sera de 5 jours ouvrés maximum, même pendant la période couverte par la garantie.

ARTICLE - 13 SUPPORT TECHNIQUE ET ASSISTANCE UTILISATEUR

Le titulaire s'engage à fournir pendant toute la durée d'exécution du marché à l'ASNR une assistance à distance pouvant répondre à des questions dans le cadre de l'utilisation du contrôleur alimentaire..

ARTICLE - 14 MAINTENANCE PREVENTIVE ET CURATIVE POST-GARANTIE

Le titulaire fournira un rapport annuel d'activité sur la maintenance et le support réalisés (préventif, curatif, mises à jour logicielles).

14.1 - MAINTENANCE PREVENTIVE

A l'issue de la période de garantie, le titulaire s'engage à fournir un contrat de maintenance préventif. Le titulaire doit assurer à minima une visite par an et assurer les contrôles et vérifications d'usage sur ce type d'équipement.

14.2 - INTERVENTIONS CURATIVES : CONDITIONS ET DELAIS

A l'issue de la période de garantie, le titulaire s'engage à réaliser les prestations de maintenance curative en cas de panne. En cas de panne nécessitant une intervention sur site, le délai d'intervention sur site sera de 5 jours maximum.

14.3 - PIECES DETACHEES ET CONSOMMABLES APRES-GARANTIE

Le titulaire doit garantir, pendant toute la durée du marché, la disponibilité des matériels nécessaires au fonctionnement optimal de l'équipement et la fourniture des pièces détachées de tous les matériels vendus après la garantie, hors matériel fourni par le LMN.

ARTICLE - 15 COORDINATION ET CORRESPONDANTS

Les référents techniques et contractuels de l'ASNR figurent dans le tableau ci-dessous :

Adresse	Interlocuteurs SAME/LMN	
ASNR/PSE-ENV/SAME/LMN 31 rue de l'Ecluse 78110 Le Vésinet	K. GALLIEZ (contractuel)	06 70 08 80 91 kevin.galliez@asnr.fr
	L. FERREUX (technique)	01 30 15 49 66 laurent.ferreux@asnr.fr

ANNEXE 1 : DIMENSION DU CONTENANT COMPATIBLE AVEC LE TRI-LATAC POUR LES ETALONNAGES ET CALIBRATIONS.

1. SG500

