

Article 1 : Introduction

1.1 But de l'installation

L'Accélérateur est un Spectromètre de Masse par Accélérateur (SMA). Le SMA mesure la concentration de nucléides cosmogéniques dans des échantillons naturels, et détermine les rapports isotopiques du nucléide cosmogénique d'intérêt à son ou ses isotopes stables (rapports variant de 10-11 à 10-16). Des cages de Faraday détectent les isotopes stables alors que le détecteur de type chambre d'ionisation comptabilise le nucléide cosmogénique d'intérêt à travers ses propriétés nucléaires.

Depuis l'avènement de la SMA, les nucléides cosmogéniques constituent des traceurs d'un intérêt primordial en Sciences de la Terre et permettent notamment :

- de quantifier les taux d'érosion des sols, et les flux de charge solide des fleuves.
- de déterminer les vitesses de déformation des structures géologiques, et donc de contribuer à l'évaluation des risques naturels.
- de dater les dépôts et marqueurs paléo-climatiques continentaux.
- de préciser les mécanismes de recharge en eau d'aquifères et d'évaluer le temps de résidence de l'eau dans différents réservoirs.
- de dater les différentes étapes de l'évolution de la lignée des hominidés.

Le laboratoire prépare différents types d'échantillon (roches, sols, eau ...) ainsi que la mesure de différents rapports isotopiques ($^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$, $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$, $^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$, ...) par l'instrument national du laboratoire. Il regroupe des universitaires, chercheurs, ingénieurs et techniciens spécialistes de ces outils et rattachés.

Article 2 : Site

2.2 Description générale

L'instrument est hébergé dans un bâtiment dédié.

Le bâtiment bénéficie d'un accès contrôlé, d'une protection anti-intrusion ainsi que d'une protection anti-incendie.

Les portes du bâtiment sont constamment verrouillées. L'accès dans le bâtiment ne peut se faire que par l'entrée principale avec ouverture de la porte par un système de reconnaissance d'empreintes digitales. Les visiteurs sont systématiquement et constamment accompagnés au sein du bâtiment.

Le bâtiment dispose d'un système d'alarme anti-intrusion qui est activé en fin de journée au départ de la dernière personne à quitter le bâtiment et désactivé le matin par la première personne entrant dans le bâtiment. Par ailleurs, depuis novembre 2021, un sas fermé à clef isole les bureaux, la salle de contrôle et le reste du bâtiment de la salle machine, restreignant l'accès à l'installation où se trouve l'instrument National

Les murs du bâtiment où se trouve l'accélérateur sont des parois en béton de 20 cm d'épaisseur. Les cloisons internes sont des parois en béton de 10 ou 20 cm d'épaisseur. Le bâtiment a un seul niveau en rez-de-chaussée (pas d'étage).

Le hall principal du bâtiment d'une surface de 564 m² sous une hauteur de plafond de 5 mètres, abrite la salle machine avec l'accélérateur, une salle de contrôle avec le poste de pilotage et un bureau et une mezzanine (2 bureaux et salle de réunion). Cette pièce a été construite sur une dalle de béton de 60 cm d'épaisseur qui repose directement sur le substratum rocheux afin de supporter la charge de l'accélérateur et d'assurer une parfaite stabilité des instruments.

La partie Nord du bâtiment renferme les locaux techniques (système de traitement de l'air, centrale électrique, système de refroidissement des eaux). La partie Sud du bâtiment est composée de salles de

préparation des échantillons, d'un atelier et de la cafétéria, isolées de la salle machine de l'accélérateur par des cloisons et un couloir. Une salle (salle OSL) dans la partie sud du bâtiment renferme un lecteur OSL avec une source scellée Sr-90.

Article 3 : Caractéristiques générales

3.1 Modalités d'utilisation

3.1.1 Principe de fonctionnement et caractéristiques physiques de(s) accélérateur(s) (caractéristiques des faisceaux, domaine de fonctionnement etc.).

La spectrométrie de masse est une technique analytique centrale de la géochimie isotopique. Elle permet de mesurer la concentration de nucléides cosmogéniques à vie longue (^{10}Be , ^{26}Al , etc) formés par l'interaction du rayonnement cosmique avec des constituants de l'atmosphère dans des échantillons naturels après dilution isotopique.

La mesure consiste ainsi à déterminer les deux éléments d'un rapport isotopique du radio nucléide d'intérêt (radioactif) sur son isotope stable dont la quantité est connue.

La particularité de cette technique vis-à-vis de la spectrométrie de masse classique, c'est qu'elle associe un accélérateur de particule de 5MV de type « tandem » à une feuille de nitrure de silicium et un déflecteur électrostatique afin d'atténuer l'effet des interférents isobariques naturellement beaucoup plus abondant. De l'ordre de 10^8 fois...

Les rapports isotopiques suivants sont mesurés en routine par l'instrument.

- $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ (interfèrent isobarique ^{10}B)
- $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ (sans interférent isobarique)
- $^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ (interfèrent isobarique ^{36}S)

L'installation du SMA comporte deux sources d'ions, une ligne d'injection basse énergie (quelques KeV), un accélérateur, une ligne d'analyse haute énergie (quelques MeV) et une ligne d'analyse en cours de développement dédiée à la mesure du nucléide cosmogénique ^{26}Al sous sa forme oxyde comprenant un aimant rempli de gaz et un détecteur qui permet d'améliorer l'efficacité globale de la mesure.

L'accélérateur de type « tandem » fonctionne à une tension terminale maximale de 5 millions de volts (5MV) et confère une énergie de l'ordre de quelques Millions d'électron-Volt (MeV), permettant les étapes de séparation des isobares.

3.1.2 Description des activités, des opérations réalisées et des matières ou produits concernés

Le SMA mesure des rapports Isotopiques entre un élément stable de quantité connue et l'élément rare recherché. Les rapports isotopiques suivants sont mesurés en routine par l'instrument.

- $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$
- $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$
- $^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$

La procédure des mesures est la suivante :

- Vérifier la température de la pièce
- Vérifier le niveau d'huile dans les pompes primaires
- Vérifier le niveau du réservoir du liquide de refroidissement tête de source (Syltherm)
- Vérifier que le débit et la pression du circuit d'eau de refroidissement des aimants et du driver de la tension au terminal.
- Vérifier la pression du SF6 dans l'enceinte de l'accélérateur (6 bars)
- Vérifier la pression de l'air comprimé (>5 bars)
- Contrôler la propreté et le fonctionnement des ventilateurs des pompes turbo.
- Vérifier la pression du gaz du détecteur « chambre à ionisation » (Ajusté suivant l'énergie des éléments mesurés.
- Mis en position des organes de guidage du faisceau (cage de faraday, et fentes)
- Mise sous tension de l'accélérateur après séchage du gaz diélectrique (SF6) au sein même de l'accélérateur,

- **Ronde de contrôle afin de vérifier l'absence de personnel** non habilité dans la salle machine du bâtiment accueillant l'installation
- **Fermeture de la porte d'accès** à la CASEMATE
- Mise en marche de la source d'ions sur un plot de repos, le plus souvent composé de carbone. L'opération s'effectue depuis le poste de pilotage et consiste à monter la température du césium dans la chambre pour amorcer et extraire le faisceau d'ion de l'élément mesuré
- Insertion des échantillons à mesurer dans la source d'ions via un carrousel et une canne d'introduction pneumatique (200 échantillons maximum).

Source 1 (source originelle) : Cette source est réservée à la mesure des nucléides cosmogéniques Cl-36.

Source 2 (source Haute Intensité) : Cette source est réservée à la mesure des nucléides cosmogéniques Al-26 et Be-10.

- Réglage des différents optiques de focalisation et de guidage du spectromètre pour optimiser la transmission du faisceau à travers la ligne. Opération intégralement menée depuis le poste de pilotage.
- Démarrage de la mesure (environ 1 heure par échantillon, soit environ 200 h pour une roue complète). La durée de la mesure dépend du nombre d'échantillons ainsi que la précision souhaitée.

En routine, l'accélérateur mesure 24h/24 et 7 jours sur 7.

La vérification du bon déroulement de la mesure s'effectue depuis l'écran de contrôle (poste de pilotage) ou bien en astreinte à distance depuis le domicile.

En fonctionnement, l'utilisateur est présent à proximité de l'appareil lors du chargement et du déchargement de la roue de 200 échantillons (aux abords des sources d'ions). Ensuite, l'utilisateur n'a aucun besoin de rester à proximité immédiate de l'instrument lors d'une analyse. Le pilotage est réalisé à partir de la salle de contrôle (isolée de l'accélérateur par un sas et une paroi vitrée). Un système de canne d'introduction pneumatique effectue le changement d'échantillon lorsque la mesure de ce dernier est terminée.

Conditions expérimentales

	Beryllium	Aluminium	Chlore	Calcium	Iode
Isotope analysé	¹⁰ Be	²⁶ Al	³⁶ Cl	⁴¹ Ca	¹²⁹ I
Isotope Stable	⁹ Be	²⁷ Al	³⁵ Cl, ³⁷ Cl	⁴⁰ Ca	¹²⁷ I
Isobare ou Interférence	¹⁰ B	Néant	³⁶ S	⁴¹ K	¹²⁷ I, ¹²⁸ Te, ¹³⁰ Te
Composition des cibles	BeO + Nb	Al ₂ O ₃ + Ag	AgCl	CaF ₂ + Ag	AgI + Ag
Matériel cathode	Cu	Cu	Ni	Cu	Ni
Rapport isotopique référence	~10 ⁻¹¹	~10 ⁻¹¹	~10 ⁻¹¹	~10 ⁻¹⁰	~10 ⁻¹¹
Courants max en sortie d'aimant injection (Mode DC)*	⁹ Be ¹⁶ O = 5 µA	²⁷ Al = 500 nA	³⁵ Cl = 30 µA ³⁷ Cl = 10 µA	⁴⁰ CaF ₃ = 250 nA	¹²⁷ I = 5 µA
Tension terminal	4.5 MV	2.7 MV	5.0 MV	5.0 MV	5.0 MV
État de charge	2+	3+	5+	4+	5+
Énergie en sortie d'aimant d'analyse (abondant)	10.62 MeV	10.8 MeV	30 MeV	22.06 MeV	30 MeV
Transmission (% particulaire) mesurée après l'aimant d'analyse	60	30	20	15	8
Courant Max au niveau de la feuille de SiN ₄ (Particulaire)**	~10nA	Néant	~5nA	Néant	Néant

3.2.1 Finalité d'utilisation

La spectrométrie de masse est la technique analytique centrale de la géochimie isotopique. Elle permet de mesurer des rapports isotopiques variés allant jusqu'à 10^{-6} . Dans le cas des nucléides cosmogéniques, tels que le ^{10}Be , leur très faible abondance implique des rapports isotopiques (par exemple $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$) de l'ordre de 10^{-12} - 10^{-8} pour les variétés atmosphériques et 10^{-14} - 10^{-12} pour les variétés in situ. De plus, l'existence d'isobares (isotopes d'éléments différents présentant le même nombre de masse : ^{10}B et ^{10}Be , ^{36}S et ^{36}Cl ou bien ^{26}Mg et ^{26}Al) dont les abondances naturelles sont beaucoup plus élevées que le nucléide cosmogénique d'intérêt, constitue une difficulté majeure pour ces techniques basées sur la séparation de masse.

Des méthodes spécifiques doivent donc être mises en œuvre pour abaisser le seuil de détection de plusieurs ordres de grandeur et assurer une bonne séparation des isobares. La SMA combine (1) les approches classiques de la spectrométrie de masse permettant la sélection par déflexion différentielle des faisceaux d'ions dans des champ magnétique en fonction du nombre de masse avec (2) des techniques des accélérateurs, employées en physique des particules, permettant un épluchage à haute énergie du faisceau d'ions et une séparation des isobares par pertes différentielle d'énergie en fonction du nombre de charge.

3.3 Description technique des parties et composants de(s) accélérateur(s) et de l'installation dans son ensemble

3.3.1 Disposition générale

Cette installation est définitive et le SMA ne peut être déplacé. Le bâtiment qui accueille l'instrument a été conçu exclusivement pour pouvoir y installer ce dernier. La structure du bâtiment et notamment le sol ont été réalisés pour pouvoir supporter l'ensemble de la ligne avec les deux réservoirs sous pression de SF_6 qui comportent pour le premier l'accélérateur et le deuxième la réserve de SF_6 .

La salle de l'accélérateur (salle machine) possède ainsi un hall stabilisé en température à $21 \pm 1^\circ\text{C}$ avec une hygrométrie contrôlée ($55 \pm 5\%$). Le taux de renouvellement de la centrale de traitement d'air est de $20\,000\text{ m}^3/\text{h}$.

L'alimentation électrique disponible au TGBT est de $380\text{V tri}/50\text{Hz}$ avec un onduleur ECUS de 80 KVA permettant de suivre une procédure de mise à l'arrêt en toute sécurité du processus de mesure et des échantillons et la sauvegarde de l'informatique et du réseau de sécurité (protection et alarmes). Des sources d'eau réfrigérée, d'eau industrielle et d'air comprimé sont disponibles sur site.

Source d'ions hybride SO-110 I

Le modèle 4150 AMS est équipé de la source d'ions hybride version SO-110 pouvant recevoir 200 échantillons. Ce modèle accepte des échantillons solides de tous les éléments d'intérêt pour la Spectrométrie de Masse par Accélérateur (SMA) ainsi que des échantillons en phase gazeuse (CO_2). Dans ce dernier cas, le modèle SO-110 peut être alimentée en gaz (en ligne) au potentiel de la masse.

Entretien facilité et court temps d'arrêt pour le nettoyage ont été les exigences essentielles lors de la conception de la source d'ions SO-110. Une autre caractéristique unique de la source d'ions SO-110 est que pour son nettoyage la tête de source est extraite par le côté du corps principal de la source. Le repositionnement de la tête de source après l'opération peut donc être fait de manière reproductible ; faisant ainsi disparaître tous les problèmes d'alignement. La conception de la source d'ions SO-110 est telle que les échantillons à analyser sont transportés d'un carrousel à l'intérieur de la source d'ions. Une telle conception empêche la possibilité de contamination croisée d'un échantillon à l'autre durant le processus de pulvérisation dans la source. Lors d'un changement de carrousel, l'intérieur de la source (ioniseur et réservoir de césium) n'est pas remis à l'air mais conservé sous vide. Par conséquent, la source d'ions peut être maintenue en mode "veille" afin de minimiser le temps nécessaire à la remise en service après un échange de carrousel. En outre, l'ioniseur peut être conservé en permanence à sa température de fonctionnement, ce qui garantit une perturbation minimale du système et résulte en une durée de vie prolongée.

Celles décrites ci-dessus et d'autres caractéristiques de la source d'ions SO-110 peuvent être résumées comme suit :

- Corps de source à la masse évitant la nécessité d'une grande cage d'isolation de la haute-tension et assurant la sécurité et la facilité d'utilisation.
- La quasi-absence de rayonnements résultant d'un corps de source entièrement métallique.
- Facilité du changement du carrousel de 200 échantillons, sans briser le vide à l'intérieur de la chambre de la source.
- Pompe à vide situé directement sur le corps de source et très proche de l'ioniseur assurant une vitesse de pompage optimale et un faible effet de mémoire.
- Entretien facile et rapide grâce au démontage de la tête source par le côté assurant un alignement exact et reproductible.
- Les échantillons sont stockés dans le carrousel et sont transportés à l'intérieur de la source d'ions uniquement durant leur utilisation. La contamination croisée est ainsi évitée.

Source d'ions haute intensité SO-110 II

Les sources d'ions à pulvérisation ionique ont été développées pour répondre aux besoins spécifiques de la Spectrométrie de Masse par Accélérateur (SMA). Elles permettent notamment un fonctionnement en continu et sans surveillance et réduisent la contamination croisée inter-échantillon et les effets mémoires.

Dans le cadre du projet XXXX, une source d'ions haute intensité a été développée. Dans la source d'ions haute intensité en développement, toutes les tensions élevées devant être appliquées sont confinées dans le corps de la source ainsi que dans une boîte de blindage qui abrite les connecteurs. En conséquence, la source peut être manipulée en cours de fonctionnement, et une cage d'isolation haute tension n'est donc pas nécessaire. Cela offre l'avantage de grandement faciliter l'accès pour les changements d'échantillons. De plus, toute l'électronique de contrôle est à la masse. Enfin, le corps de la source étant réalisée en métal, un fonctionnement sans rayonnement est pratiquement garanti.

Afin d'éviter une contamination croisée entre les échantillons, ces derniers sont stockés sur un carrousel dans une chambre à échantillons séparée de la zone active de la source d'ions. Pour l'analyse, l'échantillon est transféré dans la chambre source. Après l'analyse, l'échantillon est repositionné sur le carrousel et l'échantillon suivant peut être chargé.

Pour remplacer des échantillons sur le carrousel - ou remplacer le carrousel complet - la chambre à échantillons est ventilée par de l'argon, tandis que la chambre de la source est conservée sous vide. Cette procédure induit une durée de vie prolongée de l'équipement et de courts temps d'arrêt dus aux changements d'échantillons.

Les améliorations implantées, fondées sur l'expérience acquise auprès de l'instrument national, concernent :

La focalisation du césium sur l'échantillon. L'amélioration de la géométrie de la source permet de s'assurer que les ions Cs sont exclusivement dirigés vers le matériel issu de l'échantillon contenu dans la cible. Le matériau dans le voisinage de la cible n'étant pas bombardé par le faisceau primaire de Cs, le niveau de bruit de fond mesuré est très significativement réduit.

L'augmentation de la capacité de pompage. Une architecture plus ouverte de la source d'ions permet d'augmenter la vitesse de pompage effective d'au moins 2 ordres de grandeur

Amélioration du contrôle de la température. Un refroidissement forcé (liquide) à la base de la tête de source permet d'éviter l'ionisation du césium ailleurs que sur le seul ioniseur.

La réduction de l'effet mémoire. L'influence de ces changements de conception sur l'effet mémoire de la source a été étudiée en détail par le groupe SMA sur différentes évolutions de la source d'ions actuellement installée sur l'instrument national. Lors de ces essais, des échantillons présentant des rapports isotopiques $^{35}\text{Cl}/^{37}\text{Cl}$ de l'élément volatil chlore compris entre 370 et 0,019 ont été mesurées de manière cyclique. Les données obtenues fournissent des informations quantitatives sur l'effet mémoire de la source

d'ions dans le cas d'échantillons volatils. Ils indiquent que suite aux améliorations proposées des échantillons ayant des rapports isotopiques qui diffèrent par un facteur supérieur à quelques 10^4 peuvent être mesurée consécutivement avec un effet de mémoire fortement minimisé.

Caractéristiques de la source d'ions haute intensité en développement.

L'intensité des courants d'ions négatifs au sortir de la nouvelle source d'ions mesurée dans la cage de Faraday située entre l'aimant analyse de l'injecteur AMS et l'entrée de l'accélérateur 5 MV Tandétron) devront être :

-pour ${}^9\text{Be}^{16}\text{O}^-$ obtenu à partir de cibles BeO : $> 15 \mu\text{A}$;

-pour ${}^{27}\text{Al}^-$ obtenu à partir de cibles Al_2O_3 : $> 1 \mu\text{A}$;

L'énergie des ions au sortir de la nouvelle source d'ions en développement devra être comprise entre 30 et 40 keV ;

Les échantillons sont stockés dans un carrousel situé dans une chambre à vide séparée par une vanne électropneumatique et ne sont transportés à l'intérieur du corps de la source que pour la durée de leur analyse ;

Le porte-échantillon est refroidi durant la toute la durée de la pulvérisation ;

Le temps nécessaire au changement de carrousel est désormais minimisé ;

Pour l'entretien régulier, l'intérieur de la nouvelle source d'ions a été conçu pour être d'un accès facile et rapide et est doté d'une géométrie d'ensemble parfaitement reproductible après toutes interventions de démontage et remontage s'avérant nécessaires ;

Le boîtier de la nouvelle source d'ions est au potentiel de la terre, supprimant ainsi l'inconvénient d'une cage et des systèmes de sécurité afférents protégeant de la haute tension. Toutefois, la mise à l'arrêt automatique de toutes haute tension en cas d'ouverture est assurée ;

Les spécifications techniques

- Nombre d'échantillons:	200
- Temps changement carrousel :	~ 0.5 hrs
- Temps changement échantillon* :	~ 5 sec – 1 min
- Intérieur de la source ventilé lors du changement de carrousel :	Non
Courants d'ion négatif analysés	
${}^9\text{Be}^{16}\text{O}^-$ à partir de BeO	$> 15 \mu\text{A}$
${}^{27}\text{Al}^-$ à partir de Al_2O_3	$> 1 \mu\text{A}$

*La durée nécessaire au changement d'échantillon dépend de la position des cibles dans le carrousel. Des cibles adjacentes devraient permettre des changements en quelques secondes.

Partie basse énergie du spectromètre de masse par accélérateur

Le système HVE 4150 AMS est équipé d'un spectromètre de masse basse énergie basé sur un analyseur électrostatique sphérique de 54° à double focalisation corrigé au second ordre suivie par un aimant à 90° également corrigé au second ordre afin de constituer un système d'injection achromatique. L'analyseur électrostatique enlève la traîne haute énergie résultant du processus de pulvérisation dans la source d'ions,

réduisant ainsi les interférences moléculaires. La chambre à vide de l'aimant est électriquement isolée et peut être sous l'influence d'une haute tension d'alimentation de quelques kV rapide (« bouncer ») permettant de sélectionner différentes masses pour un champ magnétique et une énergie source constante. Elle est utilisée pour injecter les différents isotopes d'intérêt de manière séquentielle à travers l'accélérateur. Après l'aimant à 90°, un ensemble directionnel à alimentation ultra-rapide agit comme une unité de suppression de faisceau (temps de montée ~ 20 ns). Il définit avec une résolution de l'ordre de la nanoseconde les périodes exactes durant lesquelles les différents isotopes sont transportés à travers l'accélérateur. En conséquence, il élimine l'incertitude résultant du temps relativement long nécessaire à l'application de la tension sur la chambre isolée de l'aimant à 90° (µsecs). Cette configuration permet une relative haute fréquence de cyclicité (typiquement 100 Hz) du système d'injection, significativement supérieure à la cyclicité plus généralement appliqué dont la fréquence dépasse rarement 10 Hz. La fréquence de fonctionnement plus élevée réduit l'influence néfaste des défaillances de la source d'ions et des instabilités à un niveau négligeable et améliore donc la précision. En fait, le système fonctionne pratiquement en mode DC. Cette configuration a été appliquée avec succès sur tous les systèmes AMS HVE équipé d'un « bouncer » qui ont été installés à ce jour.

Les éléments clés de cette injection avec « bouncer » sont :

- Analyseur électrostatique 54° corrigé au second ordre et aimant 90° achromatique pour une optique ionique optimale.
- Application d'une suppression de faisceau rapide pour une définition exacte de la durée d'injection des isotopes.
- Alimentation haute tension du « bouncer » rapide et unité de suppression du faisceau ultra-rapide permettant une fréquence de cyclicité aussi élevée que 100 Hz.

L'accélérateur 5 Millions de Volt (MV) Tandetron™.

Le cœur de l'AMS 4150 est un accélérateur 5 MV de type Tandetron™. Son alimentation entièrement électronique garantit une grande stabilité et à une très faible ronfle. En raison de l'absence de pièces mobiles dans la production de la tension terminale, il est essentiellement libre de maintenance et sa performance n'est pas affectée par de nombreuses années de fonctionnement.

Les tubes accélérateurs de large diamètre sont optimisés pour une grande vitesse de pompage non seulement pour obtenir un bon vide de base, mais aussi pour un bon vide en cours d'opération. Ceci est réalisé grâce à des électrodes qui ont de larges ouvertures de pompage additionnelles autour de l'ouverture centrale par laquelle le faisceau est transporté. Cette configuration réduit la pression dans les tubes de l'accélérateur pendant l'opération. En outre, les tubes sont équipés d'aimants permanents qui sont montés sur les électrodes dans la partie sous vide et qui créent un champ magnétique spiralé le long de l'axe du faisceau. Le champ magnétique balaie les électrons secondaires latéralement vers les électrodes avant qu'ils n'atteignent une énergie significative. Il en résulte des niveaux de radiation minimaux en cours d'opération et étend la durée de vie du tube accélérateur.

La pression dans les tubes accélérateurs doit être faible pour éviter des échanges de charge. Aussi, une pression de gaz éplucheur constante au cours du temps est cruciale pour la spectrométrie de masse par accélérateur parce qu'elle améliore la stabilité à long terme de l'analyse. Ces exigences sont soutenues dans le modèle 4150 AMS utilisant des tubes accélérateurs qui ont une haute conductivité (voir ci-dessus) et par une pompe turbo-moléculaire qui redistribue le gaz éplucheur dans le terminal. Par conséquent, la pression dans les tubes est très faible au cours de l'opération. En outre, la pression de gaz dans le canal éplucheur est contrôlée par une jauge à vide faisant partie d'une boucle de rétroaction qui maintient la pression de gaz éplucheur constante au cours du temps.

Les principales caractéristiques de l'accélérateur 5 MV Tandetron™ sont :

- L'alimentation entièrement électronique de la haute tension à faible ronfle et une grande stabilité élimine la nécessité d'une stabilisation corona
- Des pompes turbo-moléculaires au niveau du terminal et des tubes accélérateurs de large diamètre assurent une basse pression dans les tubes au cours de l'opération

- Une stabilisation active de la pression du gaz éplucheur garantit des performances stables
- Pratiquement sans entretien, performances stables au cours du temps, faible niveau de bruit et de vibrations grâce à l'absence de pièces mobiles
- Aimants permanents incorporés dans les tubes accélérateurs pour de faibles niveaux de radiation.

Partie haute énergie du spectromètre de masse par accélérateur.

Les principales composantes de la partie haute énergie du spectromètre de masse par accélérateur sont un aimant 90° corrigé au second ordre, trois cuillères de Faraday, une feuille « absorbeur » rétractable, un analyseur électrostatique cylindrique à 35°, un aimant à 30° et une chambre d'ionisation multi-anodes. Le radio-isotope avec un ou deux isotopes stables sont mesurés de manière séquentielle. Les isotopes stables sont mesurés dans les cuillères de Faraday correspondantes dans le plan image de l'aimant à 90°. Les cuillères de Faraday pour les isotopes stables tels que ⁹Be, ¹³C, ³⁵Cl et ¹²⁷I (sur le rayon intérieur de l'aimant) et pour ²⁷Al, ³⁷Cl (sur le rayon extérieur) sont équipés d'un système interne de fente et fournissent un signal correspondant au courant ionique total, ainsi qu'une erreur signal de fente. Le signal erreur de fente est renvoyé à la tension terminale afin de stabiliser la position du faisceau dans la cuillère de Faraday à tout moment à 0,1 mm près. De ce fait, la position du faisceau isotope rare qui est essentielle pour une analyse stable est également fixée à 0,1 mm près au niveau de la feuille « absorbeur » et à l'entrée du déflecteur électrostatique à 35° qui suit. Une fois le système correctement calibré lors de l'installation, le système de stabilisation par erreur de fente garantit également que le radio-isotope entre dans l'analyseur électrostatique 35° à une position exactement reproductible, ce qui facilite considérablement le réglage du faisceau dans la partie haute énergie au cours de l'exploitation courante et optimise la précision à long terme. Les feuilles « absorbeurs » peuvent être facilement remplacées par un système à crémaillère. Deux séries de doublets quadripolaires juste avant et après le déflecteur électrostatique servent à une bonne focalisation du faisceau qui souffre d'une augmentation substantielle d'émittance du fait de la dispersion dans la feuille « absorbeur ». Un aimant à 30° réduit le bruit de fond généré par des ions qui ont été dispersés sur les électrodes du déflecteur. L'aimant est monté verticalement pour découpler la dispersion due au déflecteur électrostatique et l'aimant.

L'isotope rare est détecté dans une chambre d'ionisation à gaz, 4-anodes ($\Delta E1$, $\Delta E2$, $\Delta E3$, E-finale), haute résolution. L'analyse des données utilise le logiciel MPANT de FastComtec.

Les principales caractéristiques de la partie haute énergie du spectromètre de masse par accélérateur sont :

- Un aimant à 90° corrigé au second ordre pour une optique ionique optimale
- Un système de fentes intégré dans les cuillères de Faraday de mesure des isotopes stables qui garantit un positionnement exact du faisceau, facilite la mise au point et optimise la stabilité à long terme de l'analyse.
- Une feuille « absorbeur » rétractable entre l'aimant à 90° et le déflecteur électrostatique à 30° pour l'élimination du bruit de fond isobarique dans le cas des analyses ¹⁰Be et ³⁶Cl.

Outre le Tandetron, l'équipement comprend également un système d'assèchement et de transfert de gaz « Dilo » permettant : 1/ de maintenir un bas degré d'hygrométrie du gaz isolant SF₆ nécessaire au fonctionnement de la partie accélérateur par circulation du gaz sur des cartouches d'alumine et, 2/ de transférer ce gaz de l'accélérateur vers un tank de stockage, partie intégrante de l'équipement, lorsque qu'une intervention sur l'accélérateur s'avère nécessaire.

3.3.4 Casemate(s) (plans, dimension des protections radiologiques, matériaux constitutifs, description des discontinuités, nature des locaux attenants, incluant le sous-sol et les locaux situés au-dessus de la casemate etc.)

Les murs du bâtiment sont des parois en béton de 20 cm d'épaisseur. Les cloisons internes sont des parois en béton de 10 ou 20 cm d'épaisseur. Le bâtiment a un seul niveau en rez-de-chaussée (pas d'étage).

La casemate dans laquelle est installée l'accélérateur est une casemate dont l'accès est autorisé pendant l'émission car la dose efficace susceptible d'y être reçue est inférieure à 2 mSv intégrée sur 1 heure et le débit d'équivalent de dose ambiant est inférieur à 2 mSv/s.

3.3.5 Poste(s) de commande

Le pilotage de l'instrument est opéré depuis la salle de contrôle qui est une pièce isolée phoniquement et séparée de la salle machine où est situé l'instrument par une cloison basse (environ 1m) en plaque de plâtre surmontée d'une fenêtre permettant la visualisation de l'instrument. La salle de contrôle se situe à une distance minimale de 5 m de l'accélérateur. Son accès se fait via le sas d'entrée à la salle machine.

3.3.7 Locaux de servitudes

La partie Nord du bâtiment renferme les locaux techniques (système de traitement de l'air, centrale électrique, système de refroidissement des eaux).

Ils se composent d'un local comprenant une centrale de traitement de l'air (57 m²) et des groupes de production d'eau glacée, d'un local doté de 2 compresseurs, d'un local chaufferie et TGBT (21 m²), et enfin d'un local stockage obus (5,5 m²) et d'un local banalisé (24 m²).

3.3.8 Local de stockage des éléments activés (cibles, accessoires divers)

Une armoire verrouillée et située dans la salle machine est dédiée au stockage des matériaux potentiellement activés (ex. cage de Faraday). Voir plan Partie 2.2

4.4.2 Système de ventilation

Le hall principal du bâtiment (qui abrite la salle machine et la salle de contrôle) d'une surface de 564 m² sous une hauteur de plafond de 5 mètres (soit un volume de 2820 m³), est stabilisé en température à 21±1°C avec une hygrométrie contrôlée (55±5%). Le taux de renouvellement de la centrale de traitement d'air est de 20 000 m³ /h, soit 7 fois le volume d'air du hall par heure. Le constructeur préconise un renouvellement d'air > 1,5 fois le volume de la pièce accueillant l'accélérateur.

Article 5 : Démarche de prévention des autres risques associés (non radiologiques)

Les principaux risques à prendre en compte sont les suivants.

5.1 Risques d'incendie et d'explosion

Le risque d'incendie est lié aux risques électriques définis en 5.2.

5.2 Risques électriques

Le circuit électrique du système d'accélération est conçu pour protéger et s'enclencher contre l'exposition du personnel à des tensions dangereuses. Cependant, des tensions mortelles sont présentes dans différentes parties du système d'accélération.

5.3 Risques de corrosion dû à des émanations gazeuses (e.g., ozone)

Sans objet

5.4 Risques laser

Sans objet

5.5 Risques d'anoxie

Le gaz isolant à l'hexafluorure de soufre (SF₆) utilisé dans le réservoir de l'accélérateur est incolore, inodore et plus lourd que l'air. Bien qu'il ne soit pas toxique, il ne favorise pas la respiration. L'installation accueillant l'instrument national est dotée d'une ventilation adéquate permettant le renouvellement de l'air total de 3 à 5 fois par heure.

5.6 Risques chimiques

Certains gaz d'alimentation et/ou substances utilisées dans les accélérateurs pour produire des ions spécifiques sont extrêmement toxiques et/ou corrosifs. Les personnes manipulant ces gaz et/ou substances, ou manipulant des composants exposés à ces gaz et/ou substances doivent porter des gants en caoutchouc et un masque à particules. Un appareil respiratoire (masque à gaz) tel que le SCOTT AIR-PACK doit être utilisé lors de la manipulation de bouteilles de gaz toxiques, du travail à la source, du canal d'échange de charge ou d'autres matériaux toxiques et/ou corrosifs. Placez tous les composants exposés à des gaz ou substances toxiques et toutes les bouteilles contenant des gaz toxiques et/ou corrosifs dans une boîte à gants équipée d'un système d'échappement fonctionnant en permanence. Le personnel qui manipule ces substances toxiques et les bouteilles de gaz contenant des gaz toxiques et/ou corrosifs doit être parfaitement familiarisé avec les caractéristiques et les procédures de premiers secours de ces gaz et matériaux.

5.7 Risques liés aux champs magnétiques et électromagnétiques

Deux des composantes de la partie haute énergie du spectromètre de masse par accélérateur sont un aimant 90° corrigé au second ordre et un aimant à 30° réduisant le bruit de fond. Ces deux éléments peuvent produire dans les cas extrêmes un champ magnétique intense de 1.2T.

5.8 Risques liés au bruit

L'ensemble des groupes de pompage de la ligne (pompe turbo moléculaire et pompe primaire) sous vide génère un bruit permanent de 75 dB pouvant être aggravé à 80 dB lors de l'utilisation du système de circulation pour la purification et le séchage du SF₆.

5.9 Rupture d'enceinte ou de canalisation sous vide

La ligne de faisceau est maintenue en permanence sous un vide de 10^{-7} mbar. La mise à l'argon s'opère par secteur, à l'aide de vannes manuelles et suivant une procédure automatique définie. Faible risque de rupture accidentelle.

5.10 Rupture d'enceinte ou de canalisation sous pression

Afin de garantir l'isolation électrique, le tube accélérateur est placé dans une enceinte pressurisée contenant du SF₆. La quantité maximale de SF₆ contenue dans cette enceinte est de 1290 kg, soit une pression de +6 bars dans un volume enveloppe de 34 940 litres.

Un réservoir de stockage de 30 000 litres permet de recevoir l'ensemble du SF₆ contenu dans l'accélérateur durant sa maintenance. Lorsque l'accélérateur est en fonction, une réserve de 560 kg est préservée dans cette enceinte de stockage.

Les équipements sous pression de SF₆ ont été construits, réalisés et testés conformément à la réglementation 97/23/CE pour les réservoirs sous pression non soumis à la flamme et inspectés périodiquement selon les normes relatives aux équipements sous pression.

Par ailleurs, suivant, l'annexe 1 du CCP établissant les spécifications demandées au constructeur lors de la construction des enceintes et un rapport d'émission acoustique et les mesures d'épaisseur par ultrason confirmant l'innocuité du gaz SF6 vis vis-à-vis des parois interne de l'enceinte contenant l'accélérateur.

Les spécifications demandées au constructeur de l'enceinte sont les suivantes :

- 1) Le métal entrant dans la construction de l'enceinte doit être exempt, pendant toute la vie de l'installation, de fragilité à la température et à la pression d'une part dans les conditions de requalification périodique et d'autre part dans le domaine des températures et des pressions de service.

Les caractéristiques mécaniques du métal, mesurées sur des éprouvettes prélevées en direction des contraintes maxima, tous recuits, revenus ou traitements thermiques éventuels terminés, devront satisfaire aux deux inégalités :

$$RA > 900$$

$$A > 12\%$$

où R représente la résistance de rupture à la traction, exprimée en hectobar, et A l'allongement relatif à la rupture exprimé en centième (allongement mesuré sur des éprouvettes dont la section droite S et la distance entre repères L, exprimées dans le même système d'unités, répondent à la condition $L/2 = 5,652 \times S$).

Le constructeur fixe sous sa responsabilité la pression de calcul, celle-ci doit être au moins égale à 1,2 fois la « pression maximale de service ».

Sous une pression égale à la pression de calcul, le taux de travail du métal dans la paroi sous pression doit être inférieur à la plus faible des deux valeurs suivantes :

- un quart de la résistance à la traction du métal à la température ordinaire
- la moitié de la limite d'élasticité à 0,2 % du métal à la température maximale en service.

- 2) L'enceinte doit être pourvue d'orifices suffisants et convenablement disposés pour en permettre le nettoyage intérieur et l'évacuation des condensats éventuels.
Pour autant que la forme, les dimensions et les conditions d'emploi de l'appareil le permettront, des orifices doivent être pratiqués pour que la visite intérieure puisse être exécutée le plus efficacement possible.

- 3) L'enceinte doit être en communication permanente avec au moins un manomètre, sur la graduation duquel une marque très apparente indique la « pression maximale en service ».

- 4) Toutes enceintes ou tous groupes d'enceintes connexes ayant la même pression maximum en service, doit être garanti contre un excès de pression par un ou plusieurs organes de sûreté, non sujets à déréglage, et dont le fonctionnement soit assuré dans les conditions de leur emploi.
L'organe de sûreté doit laisser le gaz s'écouler dès que la pression atteint 1,1 fois la pression maximale en service et suffire à empêcher la pression de dépasser cette limite de plus de 10 %.

L'organe de sûreté doit être disposé, et au besoin aménagé, de manière que son fonctionnement ne comporte pas de risques pour le personnel. L'organe de sûreté est muni d'une gaine étanche assurant l'évacuation éventuelle du gaz jusqu'en un point où il cesse d'être dangereux.

L'organe de sûreté doit être démonté, éprouvé et taré au moins une fois tous les trois ans.

- 5) Aucun appareil neuf ne doit être présenté à l'épreuve, ni livré sans être accompagné d'un état descriptif, certifié par le constructeur, donnant, avec référence à un dessin d'ensemble, la nature des matériaux et des traitements thermiques éventuellement pratiqués, les formes, dimensions et épaisseurs principales minima, la constitution des assemblages, l'implantation et la nature des soudures, etc..., la désignation du ou des fluides susceptibles d'y être contenus, les limites de températures en service et la pression de calcul.
- 6) L'épreuve consiste à soumettre l'enceinte à une pression hydraulique appropriée, fixée par le constructeur sous sa responsabilité et ne pouvant être inférieure à 2 fois la pression maximale en service.

La note de calcul devra faire apparaître que l'enceinte est dimensionnée pour résister à la pression d'épreuve. Une attestation d'épreuve hydraulique sera jointe à l'état descriptif mentionné au point 5).

- 7) Le tube accélérateur doit être en communication permanente avec au moins une jauge à vide pendant toute la période durant laquelle l'enceinte est sous pression.
- 8) Les soufflets en acier placés à l'intérieur de l'enceinte doivent être munis de signes distinctifs permettant de les distinguer de ceux placés à l'extérieur de l'enceinte.
- 9) L'ensemble des circuits de vide placés à l'extérieur de l'enceinte doivent être garantis contre un excès de pression interne dû à la rupture du tube accélérateur.

Au voisinage de chaque sortie de l'enceinte sous pression, le ou les prolongements du tube accélérateur sont munis d'organes de sûreté, non sujets à déréglage, qui doivent laisser le gaz s'écouler dès que la pression à l'intérieur du tube dépasse la pression atmosphérique.

L'organe de sûreté doit être disposé et au besoin aménagé, de façon que son fonctionnement ne comporte pas de risque pour le personnel. Pour les appareils contenant des gaz inflammables ou nocifs, l'organe de sûreté, est muni d'une gaine étanche, assurant l'évacuation éventuelle du gaz jusqu'en un point où il cesse d'être dangereux.

10) Définition des différentes pressions :

P_{max} : pression effective maximale : pression ne devant jamais être dépassée pendant le fonctionnement normal de l'appareil.

Pression de calcul : correspond à un taux de travail maximum du métal

Pression de calcul $\geq 1,2 P_{max}$

Pression de tarage de la soupape de sûreté : $1,1 P_{max}$

Pression d'épreuve hydraulique $\geq 2 P_{max}$

Pression d'épreuve au gaz = $1,2 P_{max}$

- 11) La notice d'instruction du fabricant prévue par la directive 97/23/CE (annexe I - § 3.4) doit être rédigée en français.

- 12) Si la notice d'instructions prévoit une durée de vie pour l'équipement, celle-ci doit être suffisamment importante, ou non limitée, afin de ne pas pénaliser le futur exploitant.

De même si la notice prévoit une périodicité d'inspection, celle-ci ne doit pas être inférieure à 40 mois (périodicité réglementaire française). La notice ne doit pas imposer d'épreuve hydraulique périodique.

D'une manière plus générale, il faut veiller à ce que la notice ne préconise pas un entretien périodique très contraignant pour l'exploitant.

5.11 Chocs et chutes - Risques mécaniques - manutention

L'installation, la manipulation ou le déplacement de certains constituant de la ligne peuvent nécessiter l'usage de portiques (0.5t, 3t ou 5t), gerbeurs ou transpalettes susceptibles de provoquer un choc, un écrasement, un cisaillement, une coupure, un sectionnement ou des chocs avec des éléments solides.

5.12 Risques naturels (foudre, inondation, tremblement de terre etc.)

Sans objet

5.13 Risques biologiques

Sans objet

5.14 Risques liés aux rayonnements non ionisants

Sans objet

5.15 Pertes d'alimentation (électricité, refroidissement etc.)

Onduleur

5.16 Risques organisationnels et humains

Le travail isolé au sein de l'installation dans le cadre d'astreinte en dehors des heures ouvrées.

5.17 Risques liés aux vibrations et aux chocs

Sans objet