

Fourniture et à l'installation d'un aimant pour la réalisation d'un séparateur en masse couplé à de l'ionisation laser au sein du laboratoire SUBATECH à Nantes

Note technique du projet

Définition du projet

1. Objet de la consultation

La présente consultation porte sur la fourniture et l'installation d'un aimant dipolaire pour un séparateur en masse au sein du laboratoire SUBATECH. Elle concerne : la définition du design, la fourniture de l'aimant, de l'alimentation, de la chambre à vide, l'installation, la mise en service ainsi que la formation des utilisateurs à la technologie. Le système de refroidissement, le groupe de pompage, les instruments de contrôle de champ et du vide sont proposés en prestations supplémentaires éventuelles ainsi qu'une proposition de maintenance préventive et curative. Cet aimant doit impérativement être livré pour fin 2027 en raison de contraintes liées à son financement sur des fonds CPER et FEDER.

Lieu de livraison : Laboratoire SUBATECH, 4 Rue Alfred Kastler, 44307 Nantes Cedex 3

2. Présentation du laboratoire SUBATECH et de l'équipe PRISMA

La laboratoire SUBATECH est une unité mixte de recherche (UMR 6457) qui dépend de trois tutelles : l'Institut Mines Télécom à travers son école IMT Atlantique, Nantes Université, et le CNRS avec l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (IN2P3) comme institut principal de rattachement et l'Institut National de Chimie comme institut secondaire de rattachement. Le laboratoire SUBATECH est basé sur le campus IMT Atlantique à Nantes. Les activités du laboratoire gravitent autour de la physique nucléaire, de la physique hadronique, de la physique des particules et des astroparticules ainsi que de la radiochimie. SUBATECH mène également à bien des recherches liées aux thématiques de l'énergie, de l'environnement et de la santé. La consultation actuelle concerne l'équipe PRISMA (Physics of Radiation InteractionS with Matter and Applications), qui concentre ses recherches, tant fondamentales qu'appliquées, sur l'interaction des rayonnements et des particules avec la matière. Trois domaines à fort impact sociétal sont étudiés : la production de radionucléides innovants pour le diagnostic et la thérapie, l'analyse élémentaire et non destructive des matériaux et des structures et les études dosimétriques pour la radiobiologie et les radiothérapies non conventionnelles. Ces recherches sont menées en collaboration avec le GIP ARRONAX.

3. Présentation du projet SMILES

Le projet SMILES est financé dans le cadre du Contrat de plan état région (CPER 2021-2027), et porté par IMT Atlantique. Son objectif est de développer au sein de l'équipe PRISMA du laboratoire SUBATECH des dispositifs de séparation de masse utilisant des champs électrostatiques ou magnétiques couplés à l'ionisation laser sélective. Alors que le système « Time of Flight », dédié à l'analyse, utilise un champ électrique qui permet une séparation temporelle des ions produits par ionisation laser sélective, l'aimant fourni séparera spatialement les ions. Ces installations répondront aux besoins en matière d'analyse isotopique des éléments traces dans l'environnement - un enjeu majeur pour déterminer leur origine, évaluer leur impact et suivre leur migration (cuivre, radium...) - et d'analyse isotopique, ainsi que de recherche sur la séparation et la purification pour la production de radio-isotopes innovants pour la médecine nucléaire (Cu 67, Sc 44, Sc 47...). Enfin, elles permettront

également la purification et l'enrichissement d'isotopes rares. Les installations seront situées dans un nouveau bâtiment dédié au sein du laboratoire SUBATECH sur le campus IMT Atlantique.

4. Bâtiment d'accueil du dispositif

Le bâtiment comporte une salle dite « Laser » pour le dispositif d'ionisation laser et une salle dite « Aimant » (figure 1) où sera installé l'aimant. Cette dernière permettra également d'accueillir la source d'ions et la ligne faisceau (figure 2). Un oculus permet le passage du faisceau laser de la salle « Laser » vers la salle « Aimant ». La puissance maximale pour les équipements de ce bâtiment est de 60kVA. Sur le plan de la salle « Aimant » (figure 2) sont indiquées les dimensions de la salle, les dispositifs autour de l'aimant et le rayon de courbure moyen envisagé pour l'aimant d'après des premières simulations effectuées au sein du laboratoire.

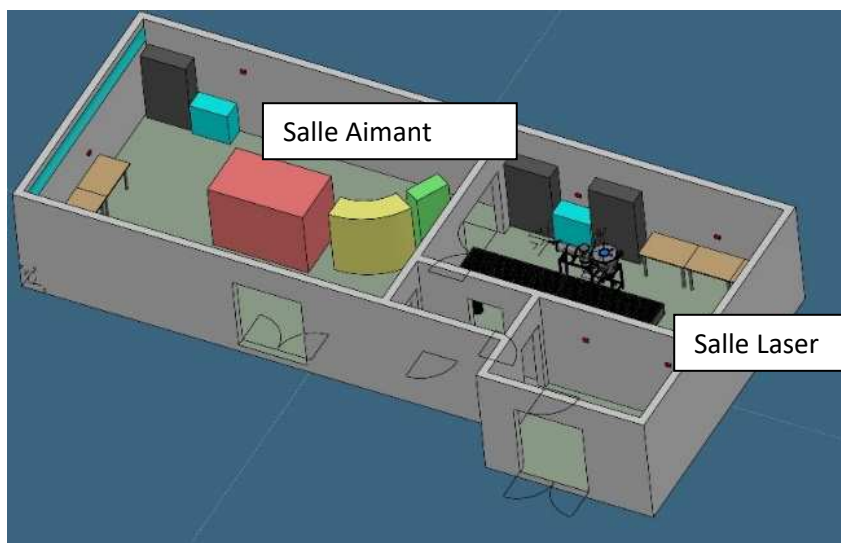


Figure 1 : Ensemble des bâtiments accueillant les dispositifs

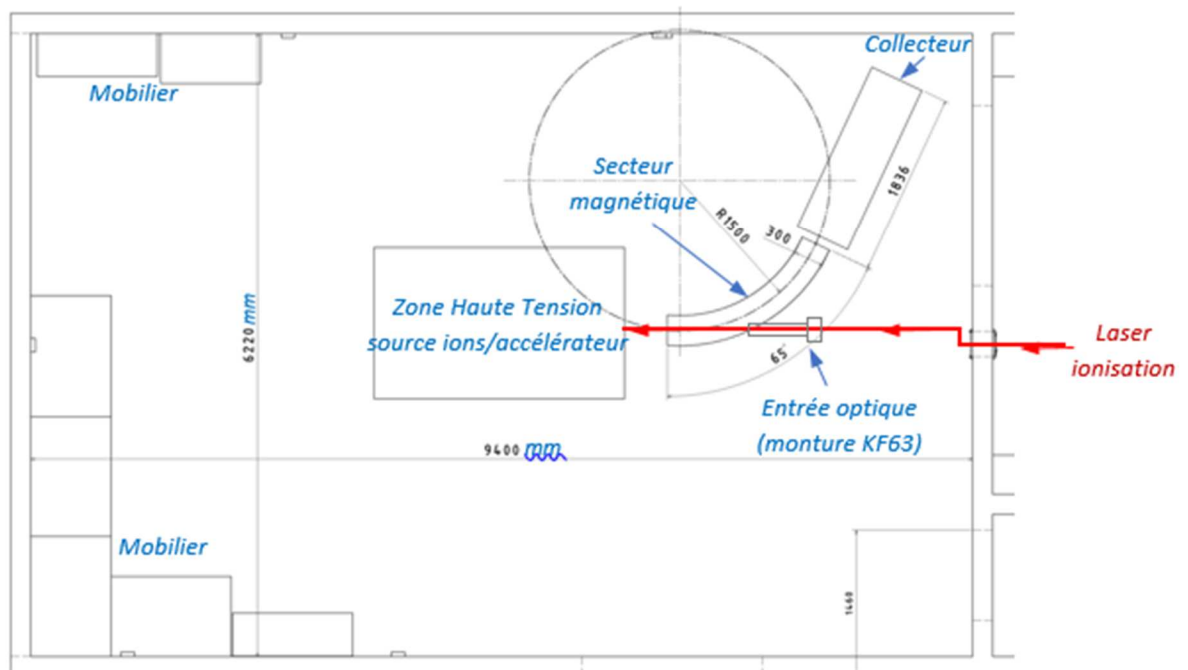


Figure 2 : Dimensions de la salle accueillant le secteur magnétique

5. Caractéristiques de l'aimant

L'aimant sera utilisé pour séparer spatialement les ions produits par ionisation laser sélective. Une première étude bibliographique ainsi que des simulations à partir du logiciel SIMION ont été réalisées pour définir les performances désirées pour l'aimant. Des dispositifs similaires RISIKO à Mayence et ISOLDE et MEDICIS au CERN nous ont servis de modèles [1,2,3].

Les paires d'isotopes ioniques considérées pour établir nos modèles et effectuer ces premières simulations sont données dans le tableau (1).

Isotopes	Masses [u]	m/ Δ m
Cuivre $^{63}\text{Cu}^+ / ^{65}\text{Cu}^+$	62.9295975 64.9277895	32
Radium $^{226}\text{Ra}^+ / ^{228}\text{Ra}^+$	226.025410 228.031070	113.2
Erbium $^{167}\text{Er}^+ / ^{168}\text{Er}^+$	166.932054 167.932376	167.4
Uranium $^{235}\text{U}^+ / ^{236}\text{U}^+$	235.043923 236.045568	235.2
Plutonium $^{241}\text{Pu}^+ / ^{242}\text{Pu}^+$	241.056852 242.058743	241.1

Tableau 1 : Paire d'isotopes utilisées pour les premières simulations permettant de caractériser les performances nécessaires pour l'aimant

L'objectif est une séparation permettant d'atteindre une pureté isotopique de 100 % pour chacune des paires d'isotopes étudiée.

5.1 Géométrie du secteur magnétique et notations

Différents paramètres permettant de décrire et simuler un secteur magnétique sont regroupés ci-dessous.

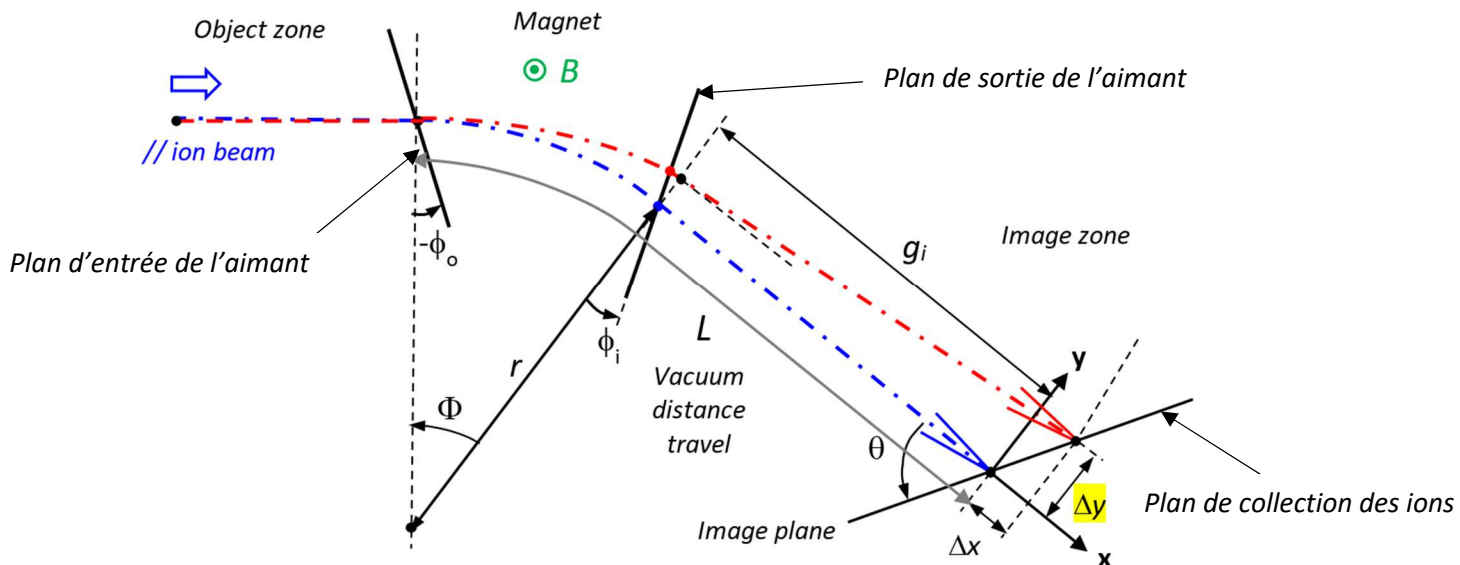


Figure 3 : Paramètres de description de l'aimant et du trajet des ions jusqu'au plan de collection

B : champ magnétique.

ϕ_o : angle d'entrée (zone objet)

ϕ_i : angle de sortie (zone image)

Φ : angle de déflexion

r : rayon de déflexion moyen

d_i : distance focale à la limite zone image : « focale extérieure zone image »

L : Parcours des ions entre l'entrée de l'aimant et le plan de collection

θ : angle plan image

Δx : séparation longitudinale

Δy : séparation radiale

5.2 Expression et valeur désirée de la séparation radiale

La séparation radiale entre deux isotopes (figure 4) s'écrit $\Delta y = D_m \frac{\Delta m}{m}$ où D_m est le coefficient de dispersion radiale exprimé selon :

$$D_m = \frac{1}{2} [(1 - \cos(\Phi))r + (\sin(\Phi) + (1 - \cos(\Phi)) \tan(\phi_i))d_i] \cdot$$

Les simulations ont permis de définir ainsi la valeur nécessaire pour l'aimant souhaité.

Ainsi, la valeur de la séparation spatiale radiale choisie doit être de **$\Delta y \geq 6.2 \text{ mm}$** .

Pour atteindre cette valeur, le coefficient de dispersion en masse D_m nécessaire, est tel que **$D_m \geq 1500 \text{ mm}$** .

5.3 Rayon de déflexion moyen

D'après la littérature, on a généralement $D_m \approx r$.

Dans ces conditions une valeur de départ qui semble convenir pour r est : $r \leq 1500 \text{ mm}$. Cependant toute solution technique permettant de réduire cette valeur tout en gardant le coefficient de dispersion souhaité $D_m \geq 1500 \text{ mm}$ conviendrait.

5.4 Valeur du champ magnétique nécessaire

Les valeurs de champ magnétique B ont été calculées pour un rayon de déflexion moyen

$r = 1500 \text{ mm}$, en fixant l'énergie maximale des ions à **60 keV** (énergie fournie par électrode accélératrice de la source d'ions), pour les ions $^{242}\text{PuO}^+$.

Ainsi, d'après ces calculs, la valeur pic du champ B à fournir est fixée à $B = 0.4 \text{ T}$.

La zone de bon champ est définie comme étant la zone dans laquelle le champ respecte un critère d'homogénéité par rapport à sa valeur nominale soit :

$(B_y(x,y) - B_y(0,0)) / B_y(0,0) < 0.01\%$ pour les dipôles dont le champ est selon l'axe y vertical.

En tenant compte des émittances de faisceaux simulées, elle correspond à une zone rectangulaire de dimensions : **$\Delta X = 50 \text{ mm}$ (horizontal) et $\Delta Y = 25 \text{ mm}$ (vertical).**

La stabilité requise pour l'alimentation est celle permettant d'atteindre un champ magnétique stable **avec une précision au dixième voir au centième de mT.**

Pour la rampe, les besoins peuvent être jusqu'à 0.2 mT / s. Ces scans sont réalisés à chaque expérience afin de balayer les masses avant collection ou analyse et déterminer la présence d'impuretés.

L'intensité est en général contrôlée afin de modifier la valeur du champ.

5.5 Environnement mécanique

L'ouverture mécanique et les connections de la chambre à vide avec les éléments de la ligne devront être mentionnées (figure 4 et 5). Les brides devront avoir la dimension la plus grande possible compatible avec la dimension de la chambre à vide. Des joints types KF (polymère) conviendront pour les brides. Pour information, les dimensions de l'ouverture inspirée de l'installation MEDICIS [2] sont de : **$[X_o = 200 \text{ mm} * Y_o = 55 \text{ mm}]$**

Enfin, concernant le passage du faisceau laser dans l'aimant, la bride devra être compatible avec la hauteur de l'enceinte à vide.



Figure 4 : Ouverture de l'aimant MEDICIS lorsqu'il était au laboratoire de Leuven [2]



Figure 5 : Intégration de l'aimant provenant de Leuven dans la ligne du séparateur en masse (MEDICIS)

5.6 Récapitulatif des caractéristiques impératives

Les caractéristiques impératives sont :

- 1) Coefficient de dispersion en masse : **$D_m \geq 1500 \text{ mm}$**
- 2) Rayon de déflexion moyen : **$r \leq 1500 \text{ mm}$**
- 3) Champ magnétique : **$B_{maxi} \geq 0,40 \text{ T}$**
- 4) Zone de bon champ selon axe y définie par **$(B_y(x,y) - B_y(0,0)) / B_y(0,0) < 0.01 \%$** de dimension **$\Delta X = 50 \text{ mm}$ (horizontal) et $\Delta Y = 25 \text{ mm}$ (vertical)**

- 5) On souhaite la présence d'une **monture KF** pour permettre l'entrée du faisceau laser d'ionisation, (Figure 6) dans l'axe de l'accélérateur. La bride devra être compatible avec la hauteur de l'enceinte à vide.



Figure 6 : Aimant MEDICIS avec la fenêtre permettant l'entrée du faisceau laser entourée en vert

5.7 Caractéristiques pouvant répondre au cahier des charges désirés

Les simulations réalisées au sein du laboratoire ont donné le jeu de paramètres suivant pouvant répondre aux caractéristiques nécessaires pour l'aimant :

Paramètres	Valeurs Spécifiées	Unit	Explications
r	≤ 1.5	m	Rayon de courbure
Dm	≥ 1.572	m	Coefficient de dispersion en masse
Δx	> 12.1	mm	Séparation longitudinale $^{241-242}\text{Pu}^+$
Δy	> 6.5	mm	Séparation radiale $^{241-242}\text{Pu}^+$
Φ	65	°	Angle de flexion
Φ_o	10.6	°	Angle d'inclinaison objet
Φ_i	30.1	°	Angle d'inclinaison image
θ	28.3	°	Angle plan image
L	< 3.54	m	Distance focale image (à minimiser)
g	55	mm	Gap
p	200	mm	Largeur du pôle
ΔX	50	mm	Zone horizontale de bon champ
ΔZ	25	mm	Zone verticale de bon champ
Homogénéité de B	$> 10^{-5}$	-	Dans la zone de bon champ
Peak field	> 0.40	T	Valeur de champ B maximale (précision au dixième voire centième de mT)
Field integral	0.70903	T·m	Intégrale de champ
Ramping speed	0.0002	T/s	
Vacuum requirement	10^{-7}	mbar	Vide à atteindre

Tableau 2 : Caractéristiques nécessaires pour l'aimant

6. Planning de mise en œuvre de l'appel d'offre

La définition du design doit répondre aux caractéristiques précédentes. Le planning ci-dessous est donné à titre indicatif.

		juin-26				juil-26			
Phases	Semaines	23	24	25	26	27	28	29	30
Appel à candidature									
Remise des offres									
Choix et signature devis									

Tableau 3 : Planning prévisionnel de mise en œuvre de l'appel d'offre

L'aimant doit être livré fin 2027. Les formations des personnels pourraient être faite jusqu'au premier trimestre 2028.

7. Evaluation des offres

L'évaluation des offres se fera selon un système de points.

Différents critères pondérés seront étudiés : le prix (40%), les délais de livraison (20%), le contenu technique des propositions (30 %), les critères environnementaux (10%).

Pour le prix, l'aimant et ses équipements, y compris le transport et la mise en service, seront pris en compte.

Pour les délais de livraison, étant donné que l'aimant doit être installé avant la fin 2027, la date limite de livraison est fixée au 30 novembre 2027. Le soumissionnaire proposant le délai de livraison le plus court et le plus réaliste recevra le score maximal sur ce critère. La date limite de livraison est fixe et doit être respectée par le soumissionnaire.

En ce qui concerne la solution technique, les critères suivants seront évalués :

- conception magnétique avec respect des caractéristiques des paragraphes 5.6 et 5.7 ;
- conception mécanique (dimensions géométriques globales, fixation des différentes pièces) avec respect des caractéristiques impératives des paragraphes 5.6 et 5.7 ;
- solution d'installation de la chambre à vide lorsque l'aimant est positionné dans la ligne du séparateur en masse ;
- perte de puissance ;
- raccordement électrique et raccordement à l'eau ;
- processus de fabrication.

Enfin, les critères environnementaux, prendront en compte, les consommations électriques et en eau du dispositif, les matériaux de construction, les modes de transports envisagés possibles et les moins coûteux d'un point de vue environnemental.

[1] The CERN-MEDICIS Isotope Separator Beamline, Yisel Martinez Palenzuela et al, *Frontiers in Medicine*, September 2021 / Volume 8 / Article 689281

[2] Characterization and optimization of a versatile laser and electron-impact ion source for radioactive ion beam production at ISOLDE and MEDICIS, Yisel Martinez Palenzuela et al, *CERN-THESIS-2019-032*

[3] Implementierung der Laserionenquellenfalle LIST bei ISOLDE und Validierung der Spezifikationen Effizienz und Selektivität, Sven Richter, Dissertation zur Erlangung des Grades Doktor der Naturwissenschaften, *Institut für Physik Johannes Gutenberg Universität Mainz Deutschland*, April 2015