



ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
& CENTRE DE RECHERCHE



Stabilisation en pression et en température du champ magnétique dans le piège à ions de précision d'ISOLTRAP au CERN

Responsables de l'encadrement :

Pierre DELAHAYE
Gilles BAN

Rapport de stage par Mélanie MARIE-JEANNE
3ème année Instrumentation Nucléaire

Mars 2005 – Juillet 2005



Table des matières

<u>LISTE DES FIGURES</u>	<u>2</u>
<u>INTRODUCTION</u>	<u>3</u>
<u>PARTIE I: ENVIRONNEMENT EXPÉRIMENTAL</u>	<u>5</u>
1. L'INSTALLATION ISOLDE	5
2. L'EXPERIENCE ISOLTRAP	6
3. PROBLEMATIQUE DE LA DERIVE DU CHAMP MAGNETIQUE	11
<u>PARTIE II: MISE EN PLACE DU SYSTEME</u>	<u>13</u>
1. SOLUTION PROPOSEE	13
2. PROGRAMMATION LABVIEW	17
3. OPTIMISATION DES PARAMETRES DE REGULATION	21
<u>PARTIE III: RESULTATS</u>	<u>25</u>
1. PROCEDURE POUR LA MESURE DE LA MASSE D'UN ION	25
2. SYSTEME DE STABILISATION ET MESURE DE LA FREQUENCE	25
3. BILAN ET PERSPECTIVES	28
<u>CONCLUSION</u>	<u>31</u>
<u>REMERCIEMENTS</u>	<u>33</u>
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	<u>35</u>

Liste des figures

FIG. 1	Vue du hall d'ISOLDE.....	5
FIG. 2	Succession des pièges à ions sur ISOLTRAP	6
FIG. 3	Principe de confinement dans le piège de Paul linéaire.....	7
FIG. 4	Structure d'un piège de Penning	8
FIG. 5	Mouvement des ions dans un piège de Penning	9
FIG. 6	Courbe de résonance en temps de vol du ^{39}K	11
FIG. 7	Courbe de dérive du champ magnétique	12
FIG. 8	Corrélation entre la température et la fréquence cyclotron	12
FIG. 9	Coupe longitudinale du réservoir du piège de Penning de précision	13
FIG. 10	Schéma du dispositif de régulation de la pression	14
FIG. 11	Montage de la régulation en pression	15
FIG. 12	Schéma du dispositif de régulation de la température	15
FIG. 13	Matériel pour la régulation en température.....	16
FIG. 14	Montage de la régulation en température	16
FIG. 15	Interface du programme de lecture de la température et de la pression	17
FIG. 16	Transformée de Fourier de la pression mesurée de l'hélium.....	18
FIG. 17	Fluctuations de la pression de l'hélium pendant une semaine	18
FIG. 18	Variations anticorrélées de la pression et de la température	19
FIG. 19	Interface du programme de régulation de la température.....	20
FIG. 20	Effet de la mise en marche effective de la régulation en température	20
FIG. 21	Boucle de régulation PID	21
FIG. 22	Détail des diverses actions du PID.....	22
FIG. 23	Etude de la réponse du système en régulation.....	23
FIG. 24	Comparaison entre diverses valeurs de la phase du PID	23
FIG. 25	Comparaison entre diverses valeurs du gain du PID	24
FIG. 26	Approximation de la courbe de résonance	25
FIG. 27	Evolution de la fréquence et de la température pour le système régulé.....	26
FIG. 28	Variations de la température et de la puissance dans la résistance chauffante.....	26
FIG. 29	Comparaison avec et hors régulation en température	27
FIG. 30	Régulation en température avec une consigne trop basse.....	27
FIG. 31	Régulation de la température avec une consigne correcte	28

INTRODUCTION

La masse atomique joue un rôle déterminant dans la compréhension de la matière nucléaire. Elle apporte des informations fondamentales à l'étude de l'interaction faible, de la structure en couche du noyau, de mécanismes astrophysiques tels que les processus de nucléosynthèse, ou encore elle permet de tester la validité du modèle standard. Dans ces domaines, une grande précision est requise sur la valeur de la masse atomique.

ISOLTRAP, à ISOLDE au CERN, est un spectromètre de masse de haute précision. On y utilise la mesure de la fréquence cyclotron dans un piège de Penning pour en déduire la masse des ions radioactifs produits par l'installation ISOLDE.

L'originalité d'ISOLTRAP est due au fait que l'expérience est constituée d'une succession de trois pièges à ions : un piège de Paul linéaire (champ électrique radiofréquence) d'abord, puis deux pièges de Penning (champs statiques magnétique et électrique croisés). Le piège de Paul linéaire permet d'augmenter l'efficacité de transport dans le spectromètre ; tandis que le premier piège de Penning a pour but de trier isobariquement les ions. Enfin, le second piège de Penning dit "de précision" permet la mesure de la masse avec une précision relative de $8 \cdot 10^{-9}$. De manière plus prosaïque, cela équivaut à connaître *la masse d'un Boeing 747 au boulon près*.

Pour cette mesure de masse, une bonne homogénéité du champ magnétique au cours du temps est requise dans le piège de précision. Or l'étude de l'erreur systématique a montré l'existence d'une dérive du champ magnétique en fonction du temps, à laquelle se superposent des fluctuations dépendant de la température. La courbe de dérive linéaire en fonction du temps ayant été évaluée, on souhaite mettre en place un système de régulation permettant d'atténuer les fluctuations du champ magnétique liées aux variations de la température. Ce dispositif constituera une amélioration technique pouvant conduire à la réduction de l'erreur systématique sur la mesure de masse.

Mon projet de fin d'études a consisté en l'installation d'un système de régulation de la pression de l'hélium servant à refroidir le piège de précision, et d'un système de stabilisation de la température de l'enceinte du piège de précision. Ce rapport expose le déroulement de ce projet pendant mes trois premiers mois de travail. La première partie décrit l'environnement de travail sur ISOLTRAP et la problématique de la stabilisation en pression et en température. En seconde partie seront détaillées les étapes de la mise en place des systèmes ainsi que les tests effectués. La troisième et dernière partie montre les améliorations obtenues lors d'une expérience de mesure de masse, et donne quelques perspectives quant à la réduction de l'erreur systématique sur la mesure de la fréquence cyclotron dans le piège de précision.

PARTIE I: Environnement expérimental

1. L'installation ISOLDE

Depuis 1992, le séparateur de masses isotopiques ISOLDE (Isotope Separator On-Line) est solidaire de l'anneau injecteur du synchrotron à protons du CERN. Ce dernier émet toutes les 1,2 secondes un paquet de $3,2 \cdot 10^{13}$ protons au maximum, d'une énergie de 1,4 GeV. Le faisceau pulsé est envoyé selon les cas sur une cible épaisse chauffée à très haute température ou sur une superposition de cibles minces. Selon la nature de la cible, on produit ainsi une grande variété de noyaux radioactifs par des réactions de spallation, fission ou fragmentation.

L'installation est équipée de deux séparateurs d'isotopes :

- GPS (General Purpose Separator) d'un pouvoir de résolution massique $\frac{m}{\Delta m} \approx 2000$.
- HRS (High Resolution Separator) avec $\frac{m}{\Delta m} \approx 5000$.

Le faisceau d'ions radioactifs est dirigé vers les diverses expériences qu'abritent les 700m² du hall d'ISOLDE. Cette distribution est présentée sur la **figure 1**. On y lit le nom de plusieurs expériences appartenant aussi bien aux domaines de la physique nucléaire et atomique (COLLAPS, ISOLTRAP, MINIBALL) qu'à ceux de la physique du solide (ASPIC).

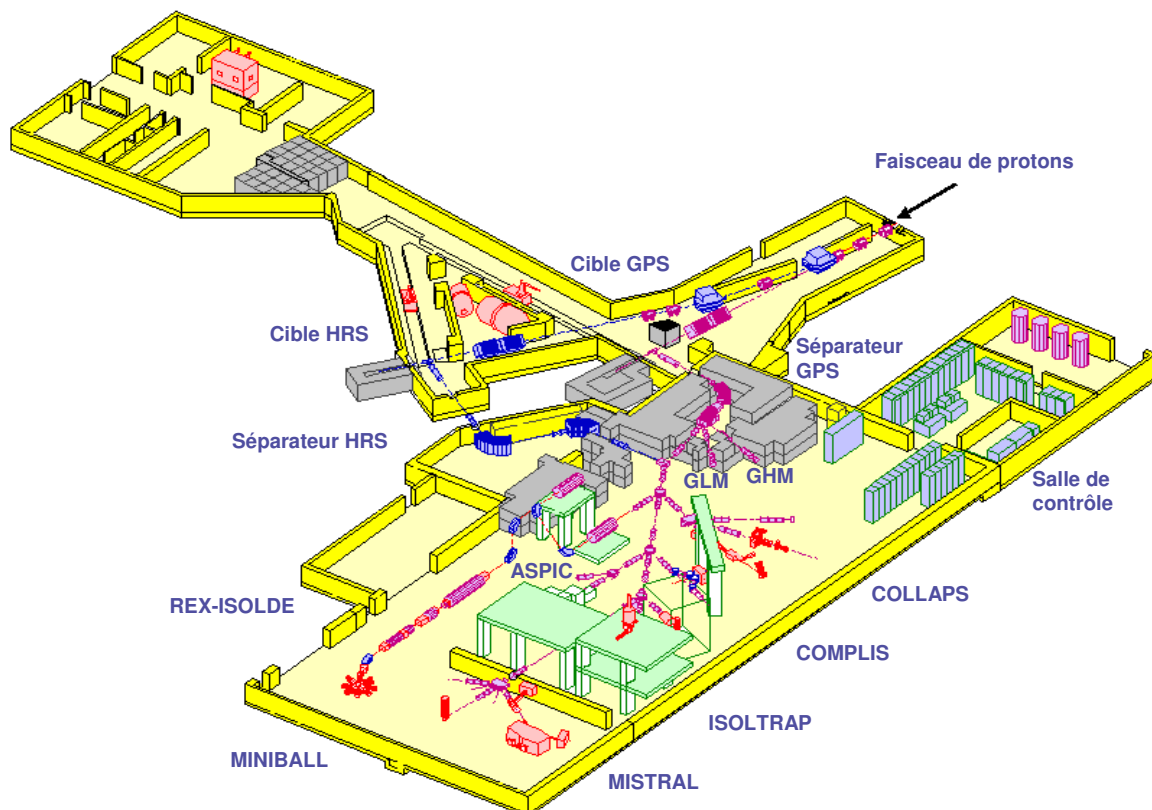


FIG. 1 Vue du hall d'ISOLDE

Les lignes de faisceau sont réparties entre les diverses expériences [1].

2. L'expérience ISOLTRAP

ISOLTRAP est une expérience dédiée à la mesure de haute précision de la masse d'ions radioactifs. On peut y mesurer la masse des ions radioactifs produits par ISOLDE ou celle des ions stables produits par une source d'alcalins. La **figure 2** illustre la disposition des trois pièges à ions permettant respectivement de préparer les ions en les accumulant en paquets, de refroidir et de sélectionner les ions voulus, puis de mesurer leur masse.

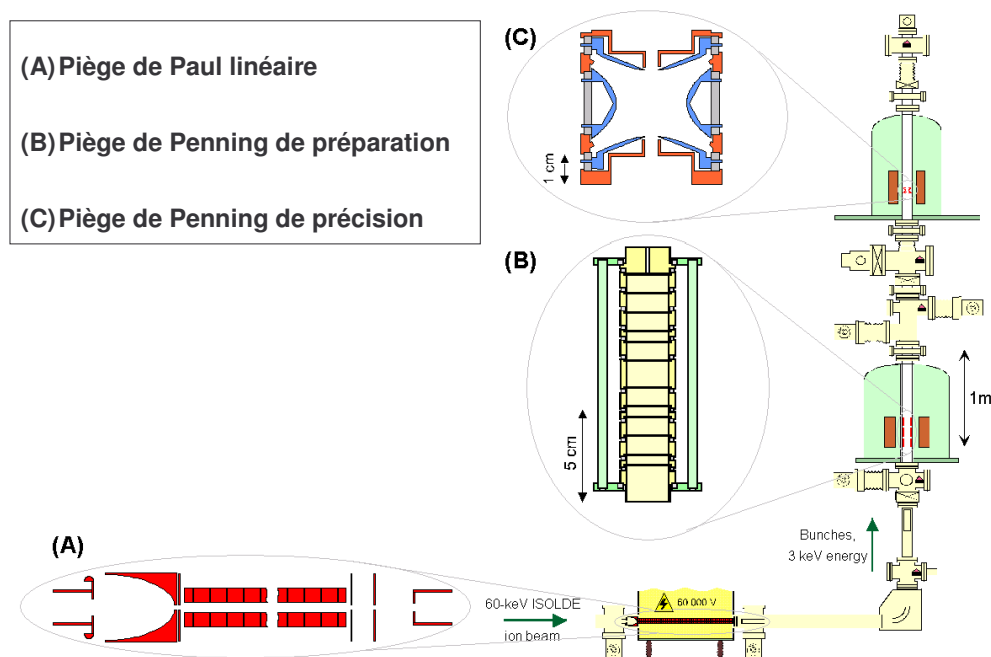


FIG. 2 Succession des pièges à ions sur ISOLTRAP

Le piège de Paul linéaire (A) accumule les ions en paquets. Le piège de Penning de préparation (B) trie les isobares. Le piège de Penning de précision (C) permet de mesurer la fréquence cyclotron correspondant à la masse de l'ion d'intérêt.

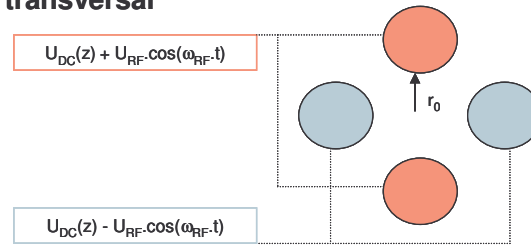
Les principes de fonctionnement de ces pièges sont décrits dans les paragraphes qui suivent.

Prenons l'exemple de la mesure de la masse d'ions produits par la source d'ISOLTRAP, et accélérés à 60kV. Les ions sont monochargés, ils ont donc une énergie cinétique égale à 60keV.

- **Le RFQ cooler buncher [2]**

Les ions sont d'abord accumulés dans le Quadripôle RadioFréquence (RFQ), ou piège de Paul linéaire, placé au potentiel de 60kV. Il est constitué de quatre barres parallèles segmentées sur la longueur, auxquelles on applique une tension continue et une tension sinusoïdale à une pulsation radiofréquence adéquate.

(A) Confinement transversal



(B) Confinement longitudinal

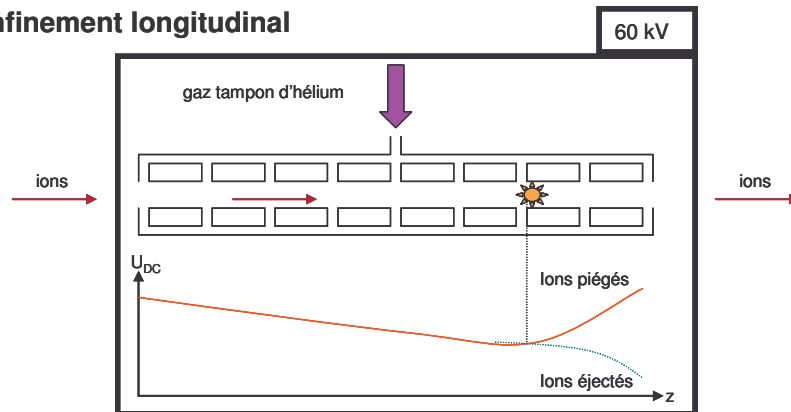


FIG. 3 Principe de confinement dans le piège de Paul linéaire

Vue du RFQ en coupe transversale (A) et en coupe longitudinale (B).

(A) : on applique aux barres du RFQ des tensions sinusoïdales opposées.

(B) : on superpose à cette tension sinusoïdale une tension continue sur les divers segments de manière à créer un puits de potentiel.

L'application de tensions sinusoïdales en opposition de phase aux barres du RFQ permet de confiner les ions sur l'axe, comme le montre la **figure 3 (A)**. Les tensions continues superposées aux segments successifs créent un puits de potentiel qui piège et regroupe les ions : c'est la fonction « buncher » (**figure 3 (B)**). Là, les ions perdent leur énergie cinétique résiduelle par collision avec les molécules du gaz tampon d'hélium, d'où le nom de « cooler ». Les « paquets » d'ions sont ensuite libérés à intervalles réguliers par abaissement de la barrière de potentiel.

A la sortie de la cage haute tension du RFQ, le faisceau est défléchi de 90° et orienté vers le premier piège de Penning.

• Les pièges de Penning

Un piège de Penning est la superposition d'un champ magnétique et d'un champ électrostatique croisés. Le champ magnétique confine les ions radialement et le potentiel électrostatique quadripolaire les piège au milieu de l'axe de révolution.

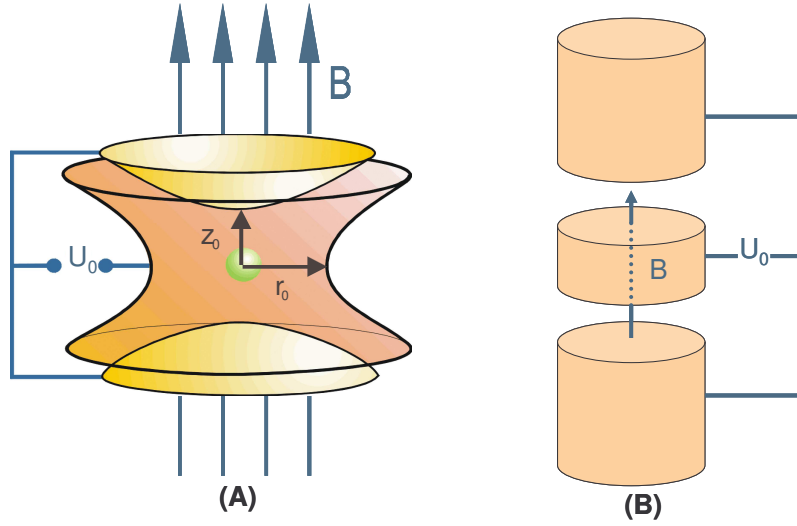


FIG. 4 Structure d'un piège de Penning

Les pièges de Penning de géométrie hyperboloïde (A) ou cylindrique (B) fonctionnent selon le même principe (voir texte ci-dessous).

La **figure 4** représente deux pièges de Penning de géométries différentes. Dans les deux cas, le principe de confinement des ions demeure le même. En se rapportant à un repère cartésien, on exprime :

le champ magnétique par $\vec{B} = B \cdot \vec{z}$ (1.)

le champ électrostatique par $\vec{E} = - \text{grad} (\Phi) = \frac{U_0}{2d_0^2} (\vec{x} + \vec{y} - 2\vec{z})$ (2.)

car $\Phi(x,y,z) = \frac{U_0}{4d_0^2} (2z^2 - x^2 - y^2)$ (3.)

est le potentiel électrostatique quadripolaire d'un piège de paramètre

$$d_0 = \sqrt{\frac{1}{2} \left(z_0^2 + \frac{r_0^2}{2} \right)} \quad (4.)$$

auquel on applique la tension U_0 .

U_0 , z_0 et r_0 sont les paramètres représentés sur la **figure 4 (A)**.

Un ion de charge q et de masse m entrant dans le piège à la vitesse v est soumis à la force de Lorentz $\vec{F} = m\vec{a} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$. (5.)

On en déduit les équations du mouvement suivantes :

$$m\ddot{x} = q \frac{U_0}{2d_0^2} x + qB\dot{y} \quad (6.)$$

$$m\ddot{y} = q \frac{U_0}{2d_0^2} y - qB\dot{x} \quad (7.)$$

$$m\ddot{z} = -q \frac{U_0}{d_0^2} z \quad (8.)$$

Les équations (6) et (7) correspondent au mouvement radial couplé des ions, tandis que l'équation (8) donne le mouvement axial.

Le mouvement axial est celui d'un oscillateur harmonique de pulsation

$$\omega_z = \sqrt{\frac{qU_0}{md_0^2}} \quad (9.)$$

dont la trajectoire dans le plan radial est donnée par

$$z(t) = \rho_z \cdot \cos(\omega_z \cdot t + \varphi_z) \quad (10.)$$

La résolution de ces équations permet de décomposer les mouvements cyclotron et magnétron, aux pulsations respectives ω_+ (pulsation cyclotron réduite) et ω_- telles que:

$$\omega_+ = \frac{1}{2} \left(\omega_c + \sqrt{\omega_c^2 - 2\omega_z^2} \right) \quad (11.)$$

$$\omega_- = \frac{1}{2} \left(\omega_c - \sqrt{\omega_c^2 - 2\omega_z^2} \right) \quad (12.)$$

Et:

$$\boxed{\omega_c = \omega_+ + \omega_-} \quad (13.)$$

où $\omega_c = \frac{qB}{m}$ est la pulsation cyclotron. (14.)

Les composantes de la trajectoire de l'ion représentées en **figure 5** sont alors:

$$x(t) = \rho_+ \cdot \sin(\omega_+ \cdot t + \varphi_+) + \rho_- \cdot \sin(\omega_- \cdot t + \varphi_-) \quad (15.)$$

$$y(t) = \rho_+ \cdot \cos(\omega_+ \cdot t + \varphi_+) + \rho_- \cdot \cos(\omega_- \cdot t + \varphi_-) \quad (16.)$$

où ρ_+ est le rayon du mouvement cyclotron, et ρ_- celui du mouvement magnétron.

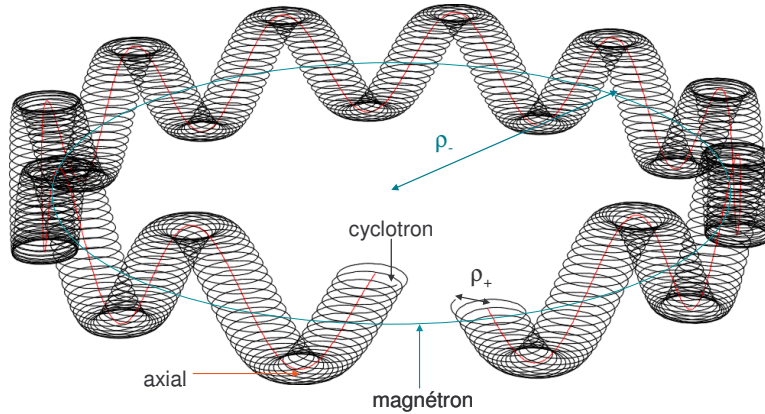


FIG. 5 Mouvement des ions dans un piège de Penning

La trajectoire des ions dans le piège se décompose en trois mouvements : le mouvement axial, le mouvement cyclotron de rayon maximal ρ_+ et le mouvement magnétron de rayon maximal ρ_- .

• Le piège de préparation

Le piège de préparation est un piège de Penning de géométrie cylindrique, afin d'augmenter le volume disponible pour l'accumulation des ions. Il est soumis à un champ magnétique de 4,7 Tesla. Il est rempli d'un gaz tampon, dans notre cas de l'hélium. Ce piège de préparation permet d'appliquer diverses excitations aux mouvements propres des ions de manière à les refroidir et à sélectionner les ions de la masse voulue.

Soit la force de frottement modélisant l'influence du gaz tampon sur les ions :

$$\vec{f} = -\delta \vec{v} \quad (17.)$$

avec δ le coefficient d'amortissement donné par la théorie de la mobilité d'un ion de charge q dans un gaz de pression p à la température T .

On résout de la même manière que précédemment les équations couplées (6) et (7) en ajoutant le terme de frottement induit par le gaz tampon. Il apparaît que l'amplitude du mouvement cyclotron dans le gaz tampon décroît de manière exponentielle tandis que celle du mouvement magnétron augmente :

$$\rho_+(t) \propto \rho_0^+ e^{-\alpha^+ t} \text{ avec } \alpha^+ = \frac{\delta}{m} \cdot \frac{\omega_+}{\omega_+ - \omega_-} \quad (18.)$$

$$\rho_-(t) \propto \rho_0^- e^{+\alpha^- t} \text{ avec } \alpha^- = \frac{\delta}{m} \cdot \frac{\omega_-}{\omega_+ - \omega_-} \quad (19.)$$

Etant donné que $\omega_+ \gg \omega_-$, l'amortissement du mouvement cyclotron à la pulsation réduite est bien plus rapide que l'expansion du mouvement magnétron.

Le mouvement magnétron a donc tendance à perdre les ions sur les bords du piège, tandis que le mouvement cyclotron les recentre autour de l'axe. En appliquant diverses excitations, on effectue le tri isobarique des ions dans le cas du piège de préparation :

- On applique d'abord une excitation dipolaire à la pulsation magnétron ω_- . Cette excitation dipolaire a pour effet l'augmentation de ρ_- et les ions s'éloignent du centre du piège.
- Puis on applique une excitation quadripolaire à la pulsation cyclotron ω_c , qui, pour les ions de la masse correspondante, convertit périodiquement le mouvement magnétron en mouvement cyclotron et inversement. D'après l'équation (21), ρ_+ diminue rapidement au cours du temps en raison des interactions avec le gaz tampon, ce qui recentre les ions sélectionnés autour de l'axe. Le reste des ions, dits «contaminants», est perdu sur les bords du piège.

Une impulsion électrostatique permet alors d'abaisser la barrière de potentiel afin d'éjecter les ions vers le second piège de Penning.

• Le piège de précision

Le piège de précision possède une géométrie hyperboloïdale pour une meilleure homogénéité du champ électrostatique quadripolaire au centre du piège. Le champ magnétique est créé par un aimant supraconducteur de 5,9 Tesla.

- Comme précédemment, on commence par exciter la trajectoire des ions à la pulsation magnétron ω_- . Puis on applique une fréquence d'excitation quadripolaire proche de la valeur de l'excitation cyclotron ω_c correspondant à la masse que l'on veut mesurer. On convertit alors partiellement le mouvement magnétron en mouvement cyclotron.
- On éjecte ensuite les ions du piège. La conservation du moment magnétique veut que l'énergie radiale des ions soit convertie en énergie axiale dans le gradient de champ magnétique à la sortie du piège. Un champ électrostatique est d'ailleurs appliqué de manière à ralentir légèrement les ions pour donner le temps à cette conversion de s'accomplir.
- Le temps de vol des ions, déclenché par l'éjection du piège, est mesuré par la détection des ions sur une galette de micro canaux. On répète le cycle pour les paquets d'ions suivants en faisant varier la fréquence d'excitation. Lorsque la valeur de l'excitation quadripolaire est exactement égale à ω_c , le mouvement magnétron est totalement converti en mouvement cyclotron. L'énergie cinétique des ions sera donc maximale et

leur temps de vol minimal. On observe alors une résonance en temps de vol du type de celle illustrée sur la **figure 6**, et la valeur correspondante de la fréquence d'excitation permet de calculer la masse de l'ion.

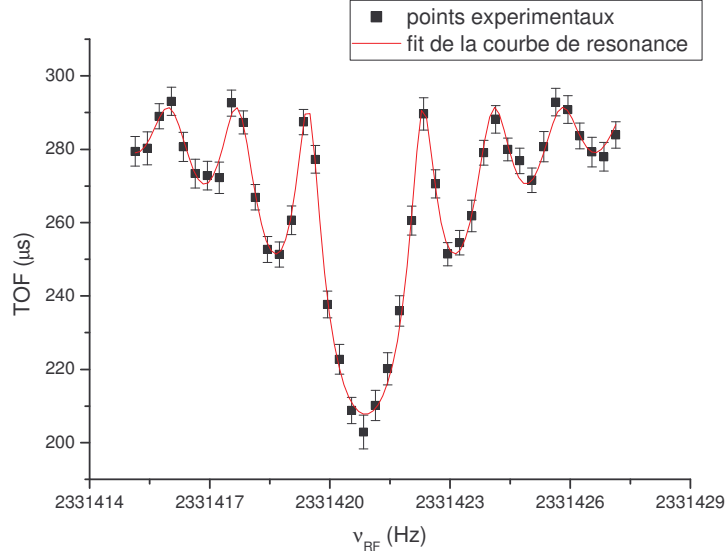


FIG. 6 Courbe de résonance en temps de vol du ^{39}K

Le temps de vol des ions ^{39}K est représenté en fonction de l'excitation radiofréquence appliquée. Les points expérimentaux sont interpolés par la courbe théorique de résonance cyclotron (en trait continu).

3. Problématique de la dérive du champ magnétique

A la résonance, la fréquence d'excitation est égale à la fréquence cyclotron totale ω_c donnée

$$\text{par la relation } \omega_c = \frac{qB}{m}, \quad (20.)$$

où m est la masse de l'ion que l'on souhaite mesurer.

Si l'on mesure la masse m_{ref} d'un ion de référence avec une très bonne précision, on peut alors établir le rapport suivant :

$$\frac{\omega_c}{\omega_{ref}} = \frac{m_{ref}}{m} \quad (21.)$$

et en déduire m avec une erreur systématique de 10^{-7} à 10^{-8} près, et une précision relative limitée par la précision avec laquelle on connaît m_{ref} et ω_{ref} .

La relation précédente est valable sous réserve que le champ magnétique demeure constant au cours du temps. Il est possible de calibrer la valeur du champ magnétique par la mesure de la masse d'ions de référence délivrés par la source d'alcalins d'ISOLTRAP. L'unité de masse atomique étant définie par un douzième de la masse du ^{12}C , on peut également obtenir une calibration absolue à l'aide de la source d'amas de carbone. Cette calibration est utilisée pour la détermination du champ magnétique avant et après chaque mesure.

Des études précédentes (voir [4] et [5]) ont montré que la valeur du champ magnétique du piège de précision décroît en fonction du temps, et subit des fluctuations dues aux conditions extérieures (température, pression...). La **figure 7**, extraite de [4], donne la courbe obtenue à l'issue de 60h de mesure du champ magnétique.

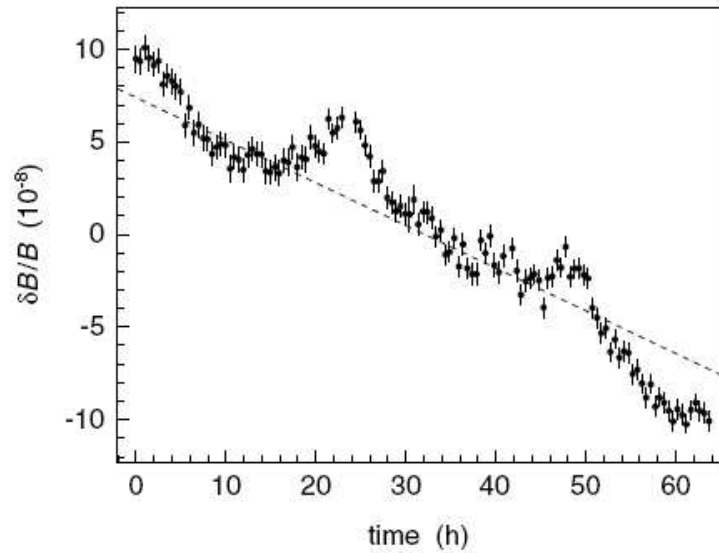


FIG. 7 Courbe de dérive du champ magnétique

Variations relatives de l'amplitude du champ magnétique dans le piège de précision sur une durée approximative de 60h. On peut les décomposer en une décroissance linéaire en fonction du temps (en pointillés) et des fluctuations dues à la température diurne/nocturne (points). Extrait de la thèse d'Alban Kellerbauer [4].

L'effet des fluctuations de la température sur le champ magnétique fut mis en évidence lors de mesures simultanées de la température et de la fréquence cyclotron déterminée dans le piège de précision, comme on peut le voir sur la **figure 8** extraite de [5]. La température au cœur du piège fut mesurée par une sonde de type Pt100. Les variations de la fréquence cyclotron mesurée reflètent directement celles du champ magnétique dans le piège.

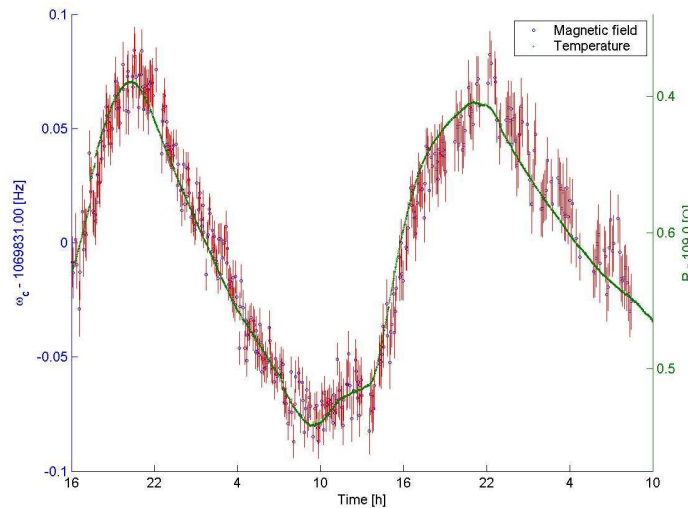


FIG. 8 Corrélation entre la température et la fréquence cyclotron

La mesure simultanée pendant presque 48h des fluctuations de la température et de la fréquence cyclotron dans le piège de précision (avec correction de la dérive linéaire en cours du temps) démontre une grande corrélation entre les deux variables. Extrait du rapport de Maxime Brodeur [5].

L'amélioration de la précision sur la mesure de la fréquence cyclotron dans le piège nécessite donc la diminution des fluctuations du champ magnétique en fonction de la température. Une solution à ce problème est détaillée dans la suite, et constitue la deuxième partie de ce rapport.

PARTIE II: Mise en place du système

1. Solution proposée

Une solution utilisée sur l'expérience SMILETRAP [7] est un dispositif de stabilisation de la pression de l'hélium et de la température du réservoir du piège de précision. La **figure 9** illustre le système de refroidissement d'un piège de Penning. La coupe longitudinale de l'enceinte du piège laisse apparaître les diverses parties du réservoir.

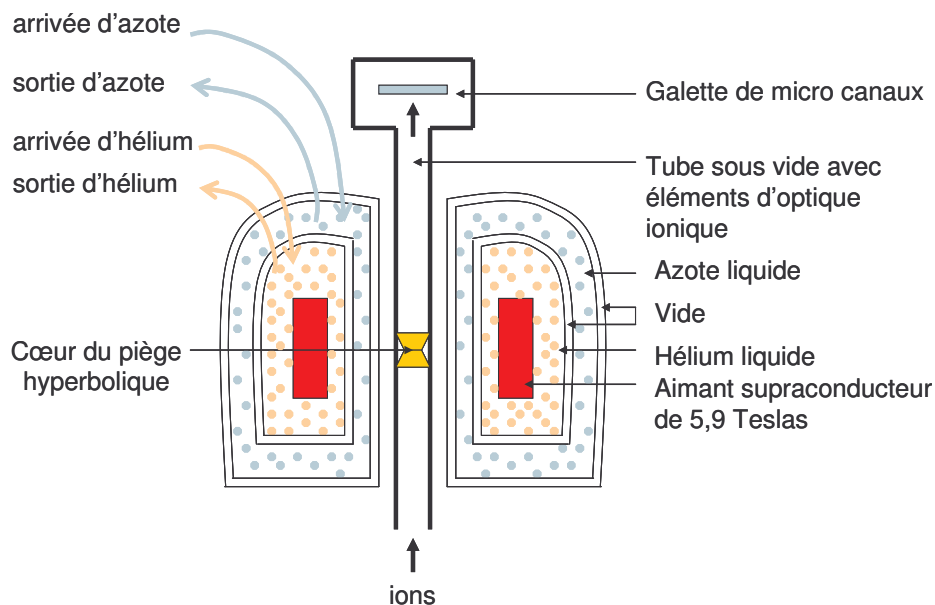


FIG. 9 Coupe longitudinale du réservoir du piège de Penning de précision

L'enceinte de refroidissement du piège de précision est composée de deux réservoirs imbriqués qui contiennent respectivement de l'azote liquide et de l'hélium liquide. Ils sont séparés par du vide. L'espace entre le tube du piège et l'enceinte du solénoïde est à l'air libre et sa température peut être régulée.

Le principal objectif est la stabilisation de la température au niveau du réservoir du piège.

Deux facteurs sont à prendre en compte :

- D'abord, l'aimant supraconducteur du piège de précision est refroidi par la double enceinte azote liquide/hélium liquide. La température fixée par l'hélium liquide influence directement la valeur du champ magnétique. Or cette température varie avec la pression de vapeur saturante de l'hélium, elle-même sujette aux variations de la pression extérieure, en particulier dans la ligne d'évacuation. On cherchera donc à réguler la pression de l'hélium dans cette ligne.
- Ensuite, le réservoir d'hélium est en équilibre thermique avec l'air du hall, lequel subit les fluctuations de la température ambiante. Or la susceptibilité magnétique du matériau constituant la chambre à vide du piège (ici l'acier inox) varie avec la température. Il est donc essentiel de conserver une température fixe et homogène dans l'espace libre entre l'enceinte et la ligne de faisceau sous vide, à proximité du cœur du piège. On prévoit pour cela de réguler la température de l'air à cet endroit.

- **Dispositif de stabilisation en pression de l'hélium**

La pression de vapeur saturante de l'hélium dans le réservoir varie en fonction des contraintes extérieures. Il faut noter que toutes les lignes d'évacuation de la surpression d'hélium des expériences sur ISOLDE sont reliées à la même ligne de récupération d'hélium pour le recyclage. C'est la raison pour laquelle l'analyse des données doit tenir compte de plusieurs événements intervenus dans le hall pendant les mesures. Le remplissage d'hélium ou même le remplissage d'azote influent sur la température du réservoir, et indirectement sur la pression de vapeur saturante de l'hélium.

Sur ISOLTRAP, les réservoirs des pièges sont remplis à l'azote liquide deux fois par semaine, tandis que le remplissage à l'hélium liquide a lieu toutes les 6 semaines.

Le système de régulation de la pression de l'hélium dans le piège est illustré sur la **figure 10**. Il s'agit d'un système standard proposé par MKS Instruments pour la régulation d'un flux gazeux. On mesure la pression de l'hélium dans la ligne d'évacuation du piège de précision à l'aide d'un manomètre capacitif. Le signal est interprété par le contrôleur, et ce dernier adapte l'ouverture de la vanne contrôlant le flux par rapport à la pression fixée par l'utilisateur. Une vanne électromagnétique de sécurité est connectée sur une branche parallèle. Alimentée par une tension constante de 24V-1.5A, elle demeure fermée. En cas de panne de courant, elle s'ouvre complètement par défaut, de manière à éviter toute surpression de l'hélium dans le réservoir pouvant occasionner des dommages éventuels.

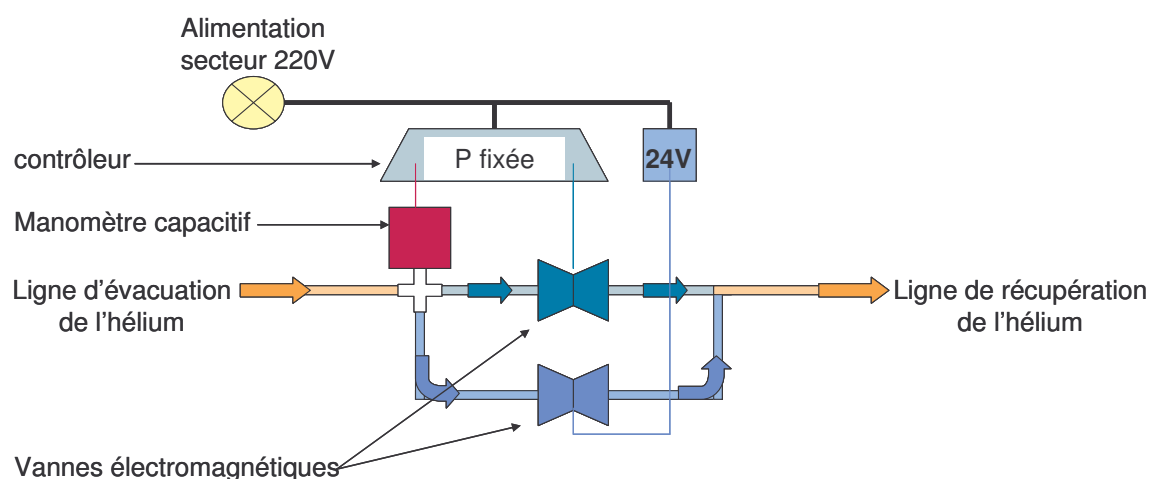


FIG. 10 Schéma du dispositif de régulation de la pression

Le manomètre capacitif, les vannes électromagnétiques et le contrôleur, constituent un système standard de régulation de flux gazeux proposé par MKS.

La documentation concernant ces divers appareils est référencée dans [8a-8d]. La **figure 11** montre le montage définitif. L'interface série permet de récupérer la tension délivrée par le manomètre afin de suivre les variations de la pression sur un multimètre Keithley 2000 (voir [9a]). Ces variations seront enregistrées par le programme LabView décrit en paragraphe III.2, via l'interface GPIB.

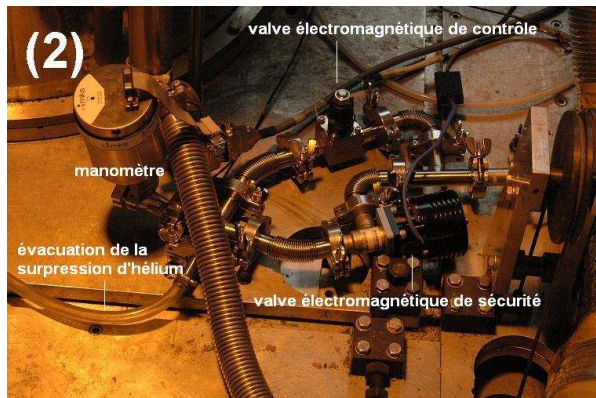
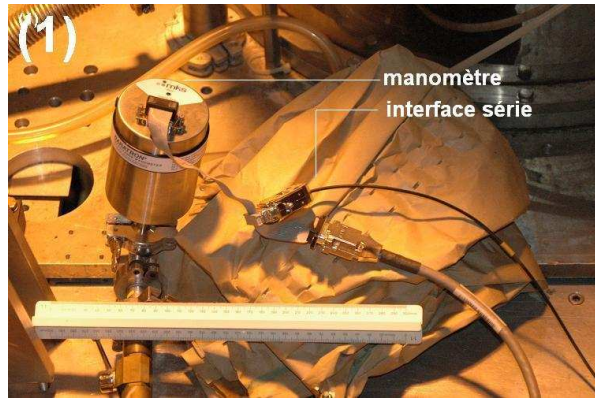


FIG. 11 Montage de la régulation en pression

- (1) manomètre capacitif de type Baratron® relié à une interface série permettant de dupliquer le signal
- (2) ensemble du dispositif schématisé en figure 10
- (3) contrôleur MKS régulant la pression autour de 760 Torrs

• Dispositif de stabilisation en température

Les études citées en I.3 suggèrent que la régulation de la température du réservoir devrait constituer le facteur déterminant pour la stabilisation de la fréquence.

Le dispositif est constitué d'un tuyau dans lequel on a introduit un ventilateur muni d'une résistance chauffante. Afin de garantir une meilleure circulation de l'air chaud dans la colonne du réservoir, le sens du flux est tel que l'indique la **figure 12**.

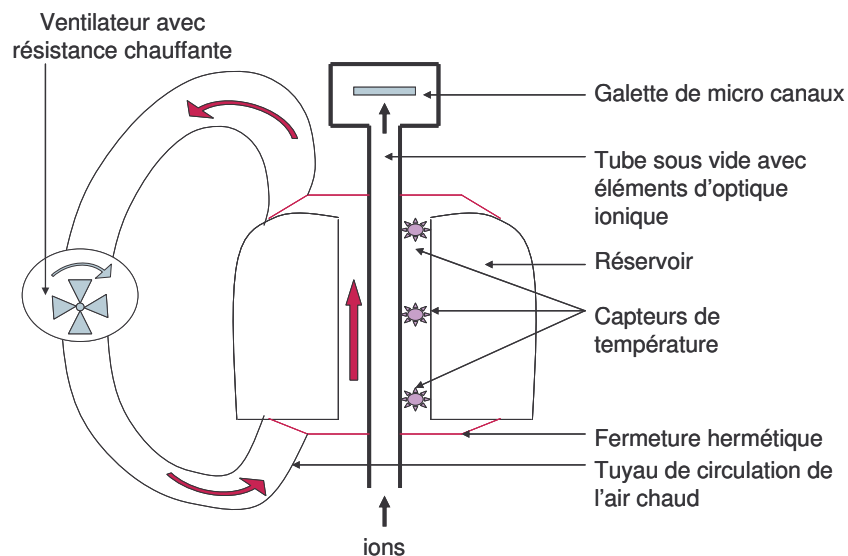


FIG. 12 Schéma du dispositif de régulation de la température

Le dispositif permet à l'air chaud de circuler naturellement dans la colonne à réguler en température.

Chaque extrémité de la colonne est scellée pour y permettre une régulation de la température de l'air. On vérifie l'homogénéité de la température à l'aide de trois capteurs de type AD590 (références constructeur en [10]) répartis sur la hauteur de la colonne à réguler. Leurs signaux sont multiplexés avant d'être envoyés à un multimètre multicanaux (voir [9b] pour la documentation concernant le Keithley 2700). Un programme de régulation en température (voir paragraphe II.2) lit les signaux sur le port GPIB et renvoie le signal approprié à l'alimentation de la résistance chauffante. Quant au ventilateur, il fonctionne en permanence pour homogénéiser la température de l'air.

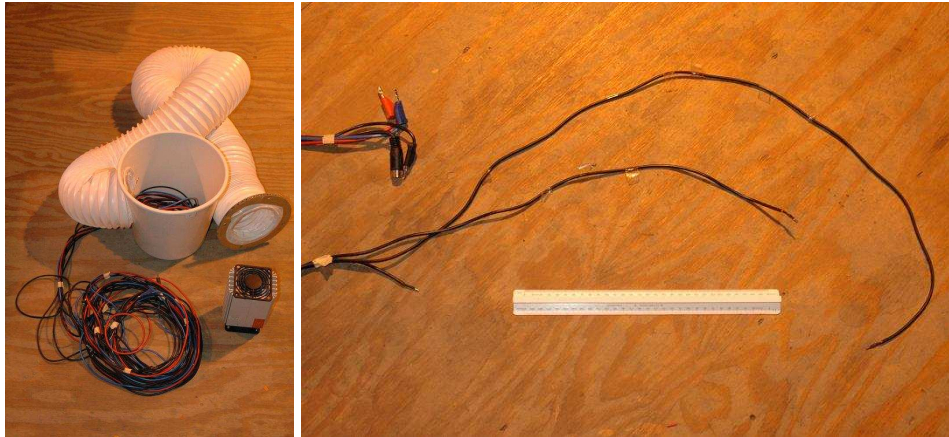
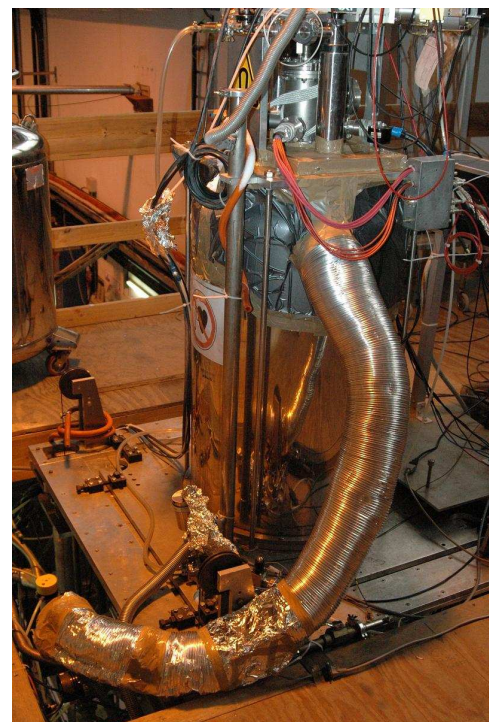


FIG. 13 Matériel pour la régulation en température

(A gauche) tuyau flexible en PVC dans lesquels on introduit câbles, capteurs, ainsi que le ventilateur contenant la résistance chauffante.

(A droite) câbles au bout desquels se trouvent les capteurs de température.

Quelques modifications techniques ont dues être apportées par rapport au dispositif initial qui avait été testé dans les laboratoires de Mayence en Allemagne. D'abord le tube flexible et extensible initial en PVC que l'on peut voir **figure 13** possède des anneaux métalliques magnétiques. Ceux-ci déforment les lignes du champ magnétique lorsqu'on les place à proximité du piège de précision. Alors l'inhomogénéité du champ magnétique ne permet pas une mesure correcte de la fréquence cyclotron. Il fut remplacé par le tuyau flexible en aluminium qu'on peut voir sur la **figure 14**.



**FIG. 14 Montage de la régulation en température
(Ci-contre)**

Le montage de test est constitué d'un tuyau en aluminium (voir texte) et scellé à chaque extrémité de la colonne à réguler par des plaques de carton ou de PVC, du plastique et de la bande adhésive.

2. Programmation LabView

LabView est un logiciel de programmation à interface graphique conçu pour dialoguer avec un grand nombre d'appareils de contrôle et de mesure.

- **Mesure simultanée de la pression de l'hélium et de la température du réservoir.**

Pour le dispositif de régulation de la pression de l'hélium, le programme fut conçu pour lire la pression de l'hélium et la température du réservoir sur les multimètres Keithley 2000 via le port GPIB. Les données sont enregistrées dans un fichier texte au choix de l'utilisateur. La **figure 15** représente l'interface de ce programme.



FIG. 15 Interface du programme de lecture de la température et de la pression

Une fois le programme lancé, on démarre et on stoppe l'acquisition à l'aide des boutons « start » et « stop ». Chaque valeur lue est affichée et représentée sur les graphes de la température et de la pression. Le programme indique la progression des mesures et le temps d'acquisition restant.

Le programme est adaptable à d'autres appareils de lecture de la pression et de la température, car c'est à l'utilisateur de préciser les domaines de mesure. Par exemple, le manomètre Baratron® de type 627B délivre une tension comprise entre 0 V et 10 V pour un domaine de mesure allant de 0 Torr à 1000 Torrs (1 Torr équivaut à 1,333 mPa). Les variations de la température correspondent aux variations de la résistance Pt100 dont l'ordre de grandeur est de 100 kΩ.

L'utilisateur choisit également la période d'échantillonnage des signaux.

On rappelle que, selon le théorème de Shannon,

$$f_{\text{échantillonnage}} \geq 2 * f_{\text{Shannon}} \quad (22.)$$

D'où la période d'échantillonnage :

$$T_{\text{échantillonnage}} \leq 0.5 * T_{\text{Shannon}} = T_{\text{max}} \quad (23.)$$

Afin de déterminer la période correcte d'échantillonnage de la pression hors régulation, on a mesuré les fluctuations de la pression toutes les 10 secondes pendant quelques jours. A l'aide du programme Origin6.1, j'ai appliqué la transformée de Fourier aux données pour obtenir la fréquence de Shannon du système. En effet, l'amplitude de la transformée s'annule pour la fréquence de Shannon et les fréquences qui lui sont supérieures, ce que représente schématiquement la **figure 16**.

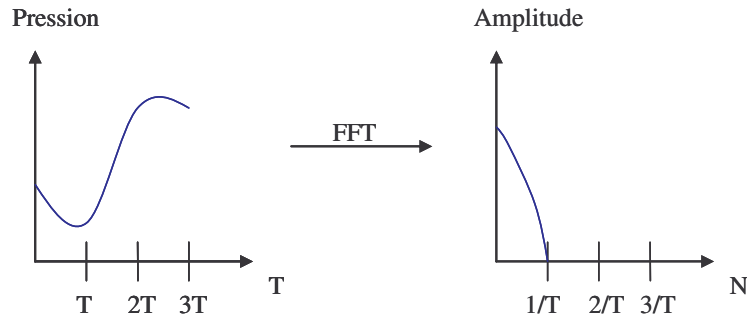


FIG. 16 Transformée de Fourier de la pression mesurée de l'hélium

Représentation schématique de la méthode de détermination de la période maximale d'échantillonnage.

On trouve alors :

$$f_{\text{Shannon}} = 0.0008 \text{ Hz}$$

$$T_{\text{Shannon}} = 625 \text{ s}$$

$$T_{\text{max}} \approx 10 \text{ min}$$

Hors régulation de la pression par le contrôleur, l'ordre de grandeur des fluctuations de la pression impose la mesure du signal au moins toutes les dix minutes afin d'obtenir une reconstitution correcte des variations.

C'est donc sans aucun dispositif de régulation qu'on a mesuré les fluctuations de la pression de l'hélium toutes les minutes pendant une semaine (voir **figure 17**), tout en notant les événements intervenus dans le hall pour une bonne interprétation des données. Il est en effet indispensable de connaître l'ordre de grandeur et de fréquence des variations afin de régler les paramètres de régulation par la suite.

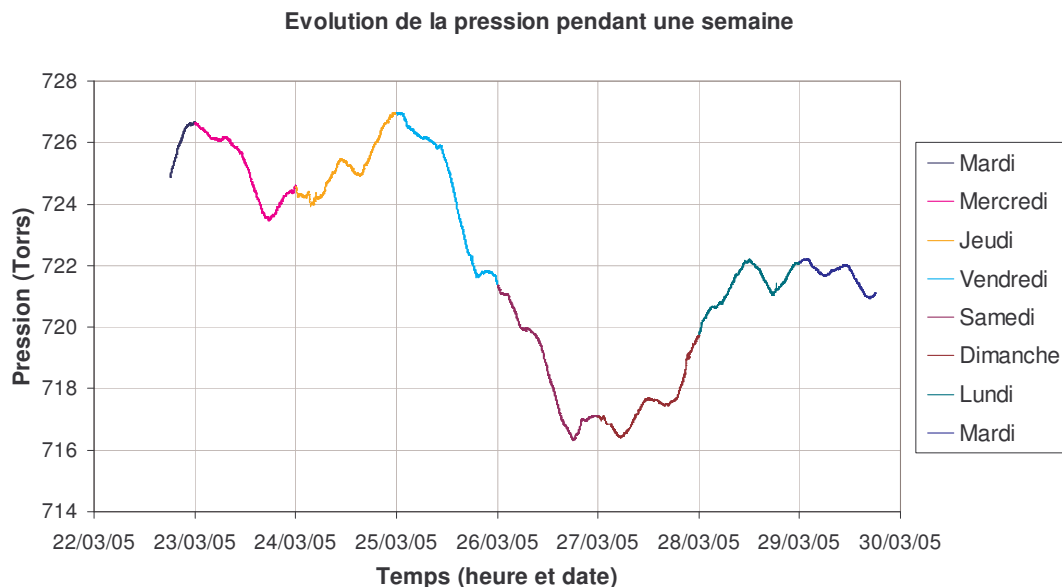


FIG. 17 Fluctuations de la pression de l'hélium pendant une semaine

Les fluctuations de la pression peuvent être décomposées en une variation générale due aux changements climatiques et à l'activité dans le hall, et en oscillations plus rapprochées marquant les différences de température entre le jour et la nuit.

On mesure des variations qui atteignent une amplitude de 10 Torrs en 48h. Des mesures ultérieures ont révélé de brusques sauts de pression de 10 Torrs en moins de 5 min lorsqu'un remplissage d'hélium a lieu sur l'une des expériences d'ISOLDE, et des sauts tout aussi brusques mais de moindre amplitude dans le cas des remplissages à l'azote.

En outre, des fluctuations plus lentes de la pression (mesurables sur plusieurs semaines) montrent des variations de 20 à 40 Torrs de la valeur moyenne de la pression. Ceci est dû non seulement aux conditions atmosphériques, mais également à la répartition des temps de faisceaux, qui a un effet déterminant sur l'activité dans le hall et la régulation externe de la pression de l'hélium dans la ligne de récupération. Ainsi, bien que l'on mesure une valeur moyenne de l'ordre de 725 Torrs fin mars, celle-ci atteint 755 torrs fin mai. Il faut rajouter à ces valeurs les brusques suppressions des remplissages pour convenir d'une valeur maximale de la pression à fixer pour la régulation. Ce procédé sera détaillé dans le paragraphe II.3.

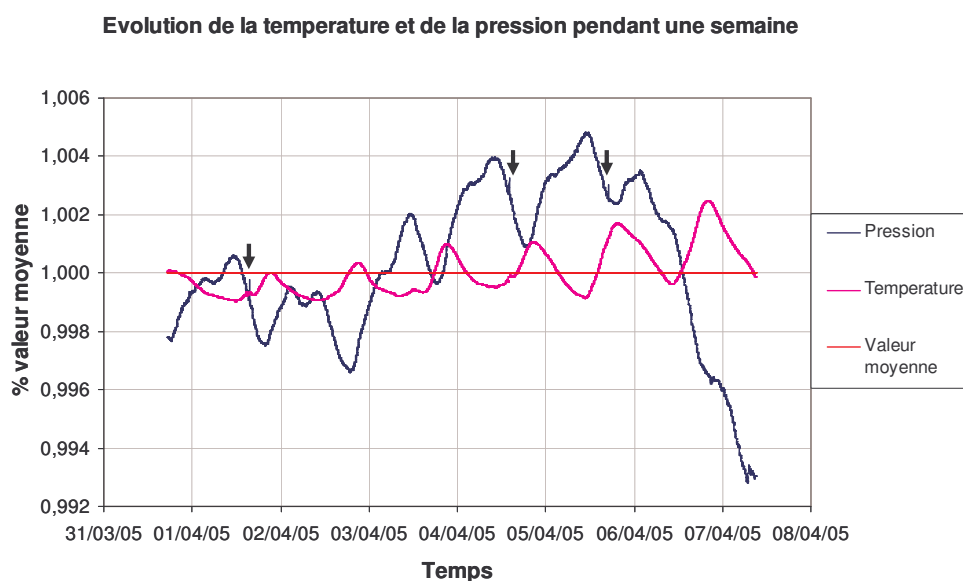


FIG. 18 Variations anticorrélées de la pression et de la température

Les valeurs de la pression et de la température oscillent avec l'alternance du jour et de la nuit. On distingue des variations soudaines de la pression les 1^{er}, 4 et 5 avril (flèches noires). Elles sont dues aux remplissages à l'azote liquide sur ISOLTRAP.

Il est à noter que la mesure simultanée de la pression de l'hélium et de la température du réservoir permet de constater l'influence réciproque suggérée par la thermodynamique entre ces deux paramètres. La **figure 18** montre leurs variations, lesquelles sont anticorrélées et marquées d'un léger décalage. La stabilisation de l'un des deux paramètres aura assurément un effet sur l'autre.

- **Régulation de la température du réservoir par circulation d'air chaud**

En ce qui concerne le dispositif de régulation, le programme LabView écrit par l'équipe de Mayence permet non seulement de lire la température donnée par les capteurs, mais également de l'interpréter dans la boucle de régulation de manière à envoyer le signal adéquat à la résistance chauffante.

L'utilisateur peut définir les paramètres de la régulation, et initialiser le système par une durée donnée de chauffage. L'interface représentée en **figure 19** permet de suivre les variations des températures ambiante, au sommet, au centre, et au pied de la colonne.

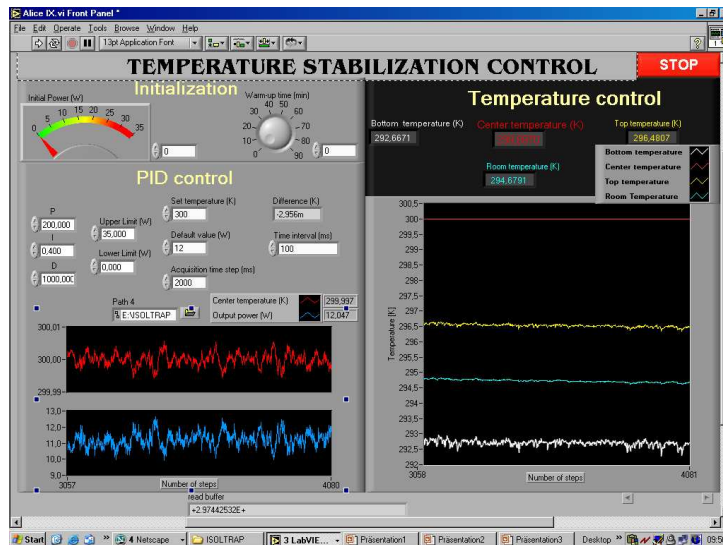


FIG. 19 Interface du programme de régulation de la température

Les divers éléments de cette interface sont décrits dans le texte.

L'interface montre également l'évolution de la valeur de la tension d'alimentation pour la résistance chauffante en fonction de la température au centre de la colonne. En effet, la régulation cherche à minimiser l'écart entre la consigne choisie pour la température et la température mesurée au centre de la colonne. On souhaite que cet écart demeure inférieur à 10mK pendant la régulation.

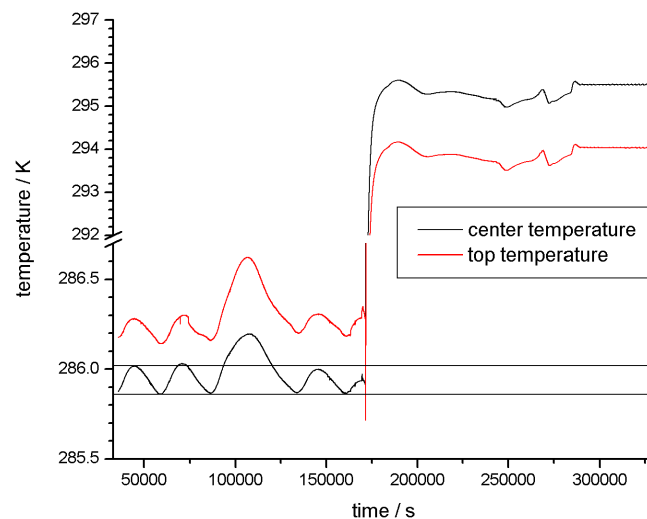


FIG. 20 Effet de la mise en marche effective de la régulation en température

L'insertion de deux ventilateurs supplémentaires dans le tuyau en $T=170000s$ permet une meilleure circulation du flux d'air et la mise en marche effective de la régulation.

On peut constater sur la **figure 20** l'effet de la mise en marche effective du système de régulation en température. En raison de la grande inertie thermique du système, le flux d'air était insuffisant pour permettre une réaction rapide aux variations. En $T=170000s$ sur le graphe, on a inséré deux ventilateurs supplémentaires dans le tuyau. Le résultat est visible peu après avec la diminution des variations.

Le programme a nécessité quelques modifications afin de pouvoir être exécuté en même temps que le programme de lecture de la température et de la pression décrit plus haut. Les deux systèmes furent reliés à un ordinateur indépendant du réseau sur lequel régulation et acquisition tournent en permanence.

3. Optimisation des paramètres de régulation

Les deux systèmes de régulation décrits plus haut utilisent une régulation de type PID.

- **La régulation PID.**

La régulation industrielle est généralement basée sur la commande PID dont les actions Proportionnelle, Intégrale et Dérivée sur le signal sont ajustées de manière empirique.

Soit une boucle de régulation PID représentée schématiquement en **figure 21**. Elle reçoit une consigne $y^*(t)$. D'après la mesure du signal de sortie $y(t)$ du système à commander, on déduit l'erreur par rapport à la consigne, dite « erreur de poursuite ». Cette erreur constitue le signal d'entrée pour le PID, dont la sortie est alors un signal de commande pour le système à commander.

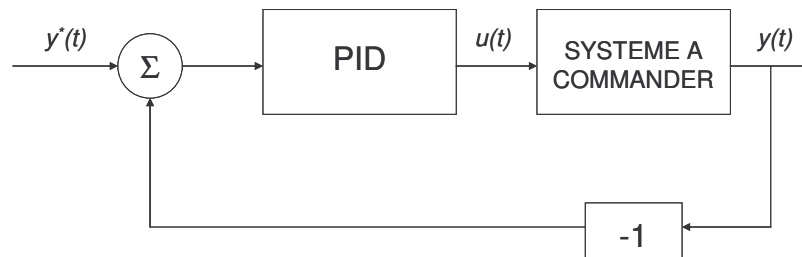


FIG. 21 Boucle de régulation PID

L'erreur entre la sortie $y(t)$ du système et la consigne $y^*(t)$ est transformée en un signal de commande $u(t)$ adapté selon les paramètres choisis pour le PID.

L'appellation PID est justifiée par le fait que le signal de commande est une combinaison linéaire de l'erreur de poursuite, de son intégrale, et de sa dérivée filtrée.

En effet, la loi de commande correspondante est donnée par :

$$u(t) = u_p(t) + u_d(t) + u_i(t) \quad (24.)$$

avec

$$u_p(t) = K(\alpha_p y^*(t) - y(t)) \quad (25.)$$

$$\left(\rho + \frac{1}{T_{fd}}\right) u_d(t) = K \frac{T_d}{T_{fd}} \rho(\alpha_d y^*(t) - y(t)) \quad (26.)$$

$$\rho u_i(t) = K \frac{1}{T_i} (y^*(t) - y(t)) \quad (27.)$$

où K , T_i , T_d , et T_{fd} désignent respectivement le gain proportionnel, le temps d'intégration, le temps de dérivation et la constante de temps du filtre de réalisation de l'action dérivée. Les coefficients α_p et α_d caractérisent la structure PID considérée. ρ est le paramètre de la transformée de Laplace : ρ représente l'opérateur dérivation et $\frac{1}{\rho}$ l'opérateur intégration.

Dans le cas des dispositifs de régulation en pression et en température, la structure du PID est définie par :

$$\alpha_p = \alpha_d = 1 \quad (28.)$$

L'action de dérivation est effectuée par un filtre de fonction de transfert :

$$F_d(\rho) = \frac{T_d \rho}{1 + T_{fd} \rho} \quad (29.)$$

Alors on peut poser :

$$u_p(t) = K(y^*(t) - y(t)) \quad \text{avec } K = K_p \quad (30.)$$

$$u_d(t) = K F_d(\rho) (y^*(t) - y(t)) \quad \text{avec } K T_d = K_d \quad (31.)$$

$$\rho u_i(t) = K \frac{1}{T_i} (y^*(t) - y(t)) \quad \text{avec } K \frac{1}{T_i} = K_i \quad (32.)$$

On peut modéliser le PID lui-même par le schéma de la **figure 22**.

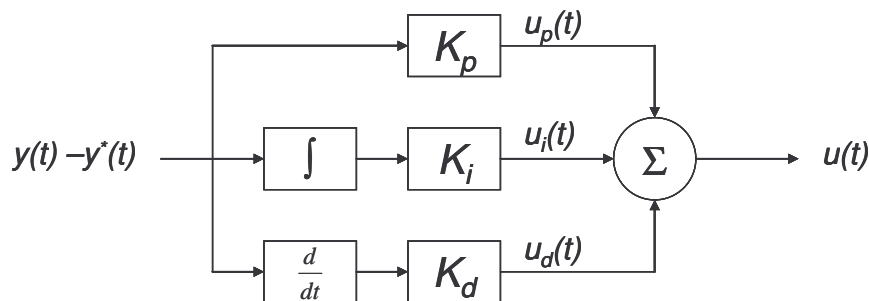


FIG. 22 Détail des diverses actions du PID

K_p , K_i , et K_d agissent respectivement sur le gain proportionnel, l'intégration, et la dérivation de l'erreur de poursuite.

- **Performances du système en poursuite et en régulation.**

Les délais de l'expérience ne permettant pas une étude des paramètres optimaux du PID pour la régulation en température, on se concentre pour l'instant sur les paramètres de la régulation en pression.

Le contrôleur fourni par MKS Instruments ne permet le réglage que de deux paramètres parmi les trois principaux cités plus haut : K_p et K_d . Le réglage du gain K_p permet de réagir proportionnellement à l'amplitude de l'erreur, et le réglage de l'avance de phase K_d proportionnellement à la rapidité des variations de l'erreur.

L'action intégrale K_i est fixée par le contrôleur. Elle envoie à la vanne électromagnétique un signal proportionnel à la durée de l'erreur, c'est-à-dire qu'elle détermine s'il est nécessaire de réguler ou non.

Les paramètres du PID déterminent les performances du système en poursuite et en régulation.

Le contexte idéal pour la poursuite est le cas où les perturbations qui peuvent survenir au niveau du système à commander sont identiquement nulles. Néanmoins, lors d'une régulation peu perturbée, on considérera une erreur inférieure à 1% comme satisfaisante. Pour tous les paramètres ayant été testés par la suite, on a pris soin de vérifier les conditions de performances en poursuite énoncées ci-dessus. On optimise donc les paramètres en régulation.

On juge des performances du système en régulation d'après sa réponse à une perturbation aussi proche que possible de l'échelon. Etant donné le temps de latence pour le flux gazeux dans la ligne d'évacuation, on modélise cet échelon par l'ouverture de la vanne électromagnétique de sécurité pendant dix minutes environ.

On compare alors les valeurs du dépassement, de l'amortissement du signal, de l'amplitude des oscillations résiduelles (ou « overshoot ») ainsi que leur pseudo-période (voir **figure 23**).

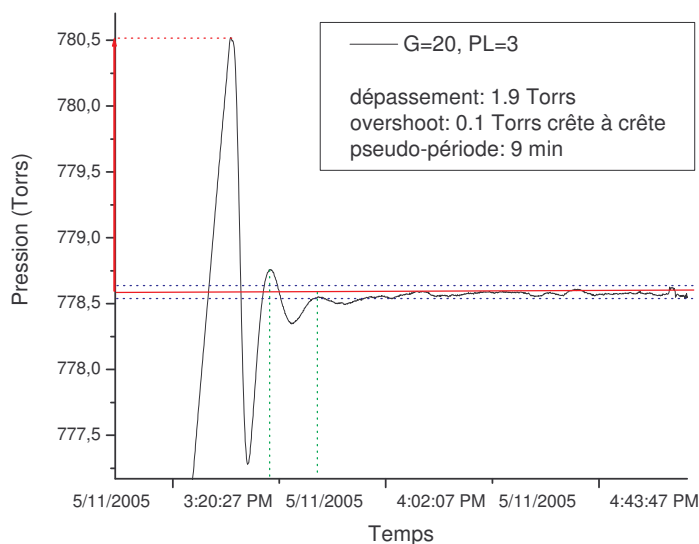


FIG. 23 Etude de la réponse du système en régulation

Le gain G est de 20 et l'avance de phase (« Phase Lead » en anglais) PL est pris égal à 3.

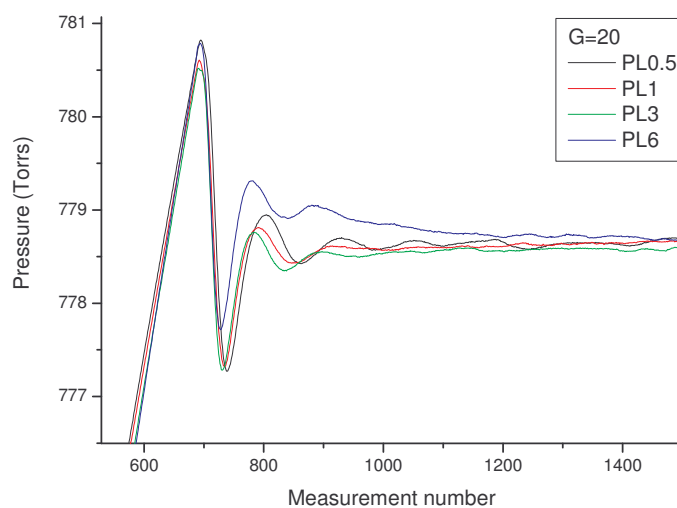


FIG. 24 Comparaison entre diverses valeurs de la phase du PID

Comparaison des diverses valeurs de la phase pour une valeur standard du gain. Pour les avances de phase (PL pour « Phase Lead ») de valeurs 1 et 3, la réponse est plus rapide, avec un dépassement moindre.

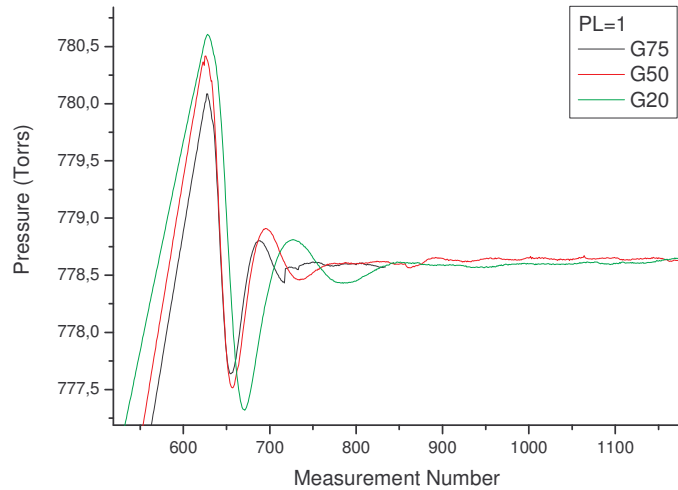
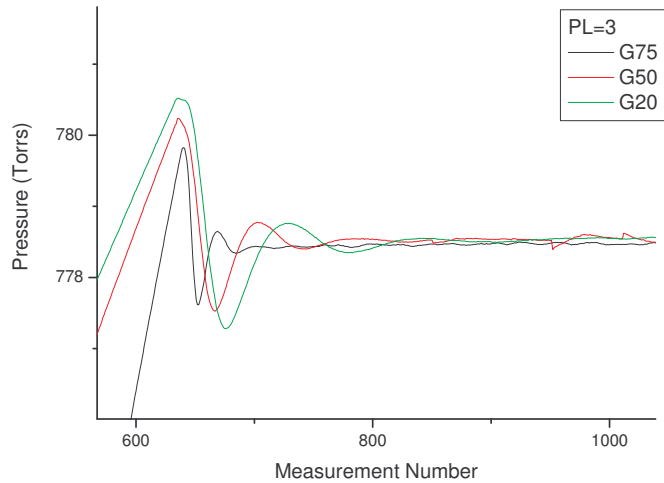


FIG. 25 Comparaison entre diverses valeurs du gain du PID

Dans les deux cas, le gain le plus adapté semble être $G=75$



Au vu des courbes des **figures 24** et **25**, on maintient les paramètres G (gain)=75 et PL (avance de phase)=3 pour le moment. Les caractéristiques d'une régulation faite avec ces paramètres sont :

En régulation : un overshoot de 0.13 Torrs.

En poursuite : un dépassement de 1.3 Torrs, un constante de temps d'amortissement de 2 min, une pseudo-période des oscillations de 5min 30s. On retrouve le régime de régulation au bout d'une durée de 30min.

Cependant les mesures ne furent peut-être pas toutes effectuées dans les mêmes conditions en raison de la baisse d'activité dans le hall suivant les temps de faisceau. On veillera donc par la suite à tester de nouveau les paramètres choisis.

PARTIE III: Résultats

1. Procédure pour la mesure de la masse d'un ion

- **Optimisation des éléments de la ligne.**

Lors des préparations de temps de faisceau sur ISOLTRAP, j'ai essentiellement pris part au travail d'optimisation des éléments de la ligne selon la procédure détaillée dans [11a].

Les paramètres sont réglés pour une masse de référence proche de la masse que l'on souhaite mesurer. Les ions de référence utilisés sont produits par la source d'alcalins d'ISOLTRAP : ce sont le ^{39}K , le ^{85}Rb , et le ^{133}Cs .

- **Fit de la courbe de résonance**

Lorsque les réglages sont terminés, on peut observer une courbe de résonance en temps de vol comme illustrée en partie I.2 **figure 6**. Il faut alors l'approximer à l'aide de fonctions connues pour retrouver la fréquence cyclotron avec exactitude (voir **figure 26** ci-dessous). On utilise pour cela un programme d'évaluation appelé Eva, dédié au traitement des données.

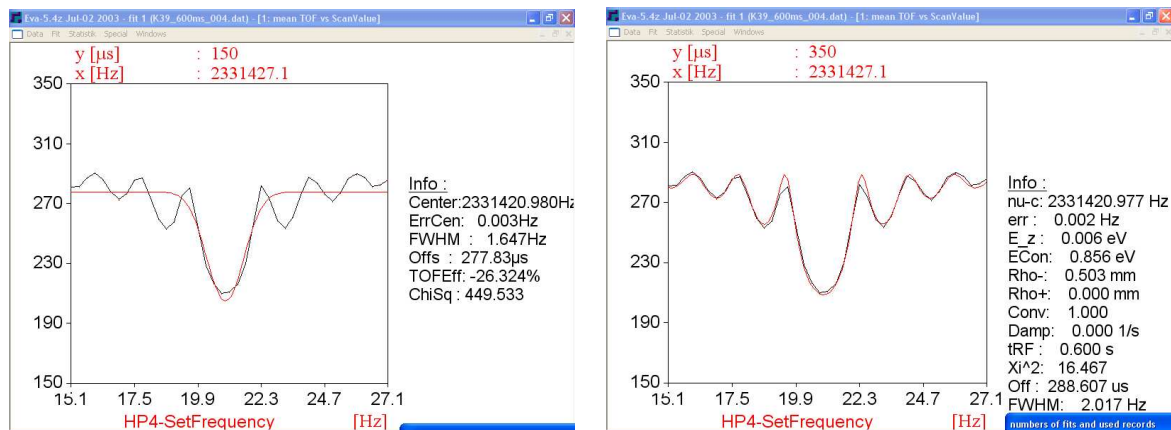


FIG. 26 Approximation de la courbe de résonance

(A gauche) La gaussienne n'approxime que la résonance de manière grossière.

(A droite) La fonction de M. König permet une détermination plus précise de la fréquence cyclotron.

Le fit gaussien permet de retrouver grossièrement la résonance. Mais le fit d'après une fonction établie par Mike König [3] approxime les oscillations (dites "sidebands") du temps de vol de part et d'autre de la résonance, ce qui permet de déterminer avec précision la valeur de la fréquence cyclotron sur l'ensemble des mesures sélectionné.

2. Système de stabilisation et mesure de la fréquence

On cherche à observer l'effet du système complet de stabilisation en température sur la stabilité de la fréquence. Pour cela, on réalise des mesures en continu de la masse du ^{39}K produit par la source d'ISOLTRAP. Dans l'équation (20), le rapport m/q étant connu, les variations de la fréquence cyclotron reflètent bien celle du champ magnétique.

Une première série de mesures s'est déroulée dans la période du 15 au 19 mai, alors que le système de régulation de la température venait d'être installé. On peut observer sur la **figure 27** les conséquences de l'ajout de deux ventilateurs dans le circuit afin d'améliorer la circulation de l'air chaud.

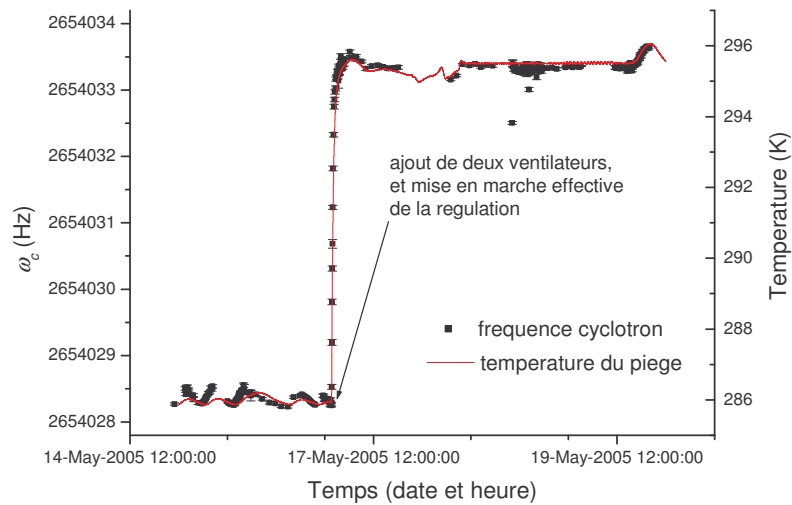


FIG. 27 Evolution de la fréquence et de la température pour le système régulé

Le système est régulé en température et en pression. La dérive linéaire de la fréquence au cours du temps a été corrigée. Les oscillations cessent à la mise en marche effective du système de régulation de la température.

La dérive du champ magnétique en fonction du temps a été corrigée. On remarque que les fluctuations en fonction du temps sont fortement atténuées. Cependant, l'apparition d'oscillations vers la fin en régime régulé prouve que les paramètres du PID ne sont pas encore optimaux. La **figure 28** représente un zoom sur cette zone en régulation.

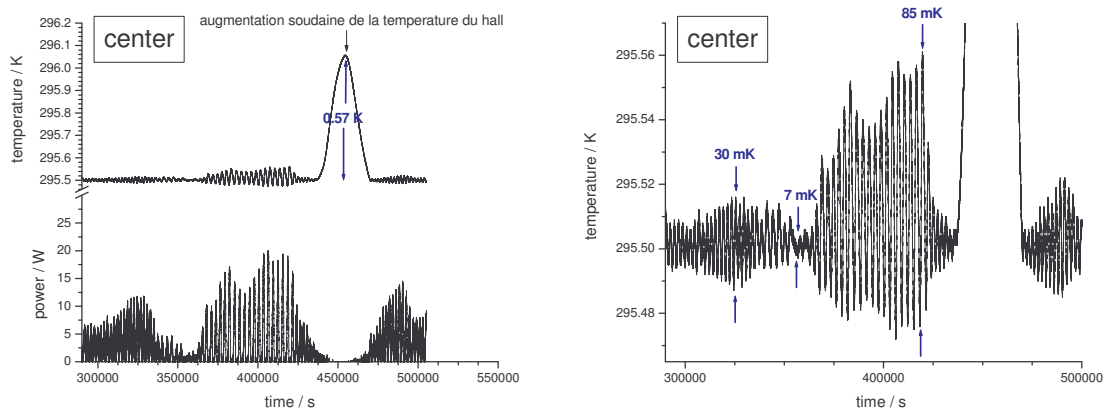


FIG. 28 Variations de la température et de la puissance dans la résistance chauffante

On observe des oscillations croissantes de la température au centre de la colonne. La résistance chauffante réagit en chauffant rapidement par à-coups. Une variation de 10 mK à 90 mK montre que la consigne en température n'est pas adaptée.

Une seconde série de mesures a eu lieu dans la semaine du 24 mai au 1^{er} juin (voir **figure 29**). Des difficultés avec le logiciel de contrôle d'ISOLTRAP nous ont contraint à réguler

manuellement la pression de gaz tampon dans le piège de préparation. Chaque série de mesure dure donc de 24h à 48h.

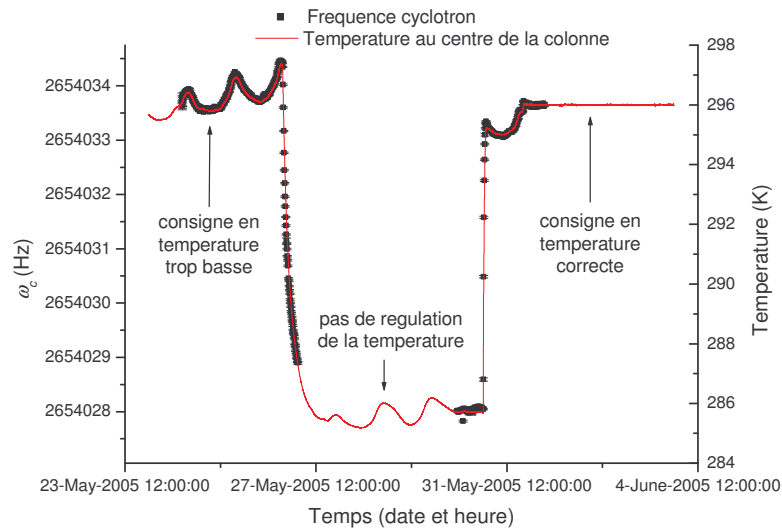


FIG. 29 Comparaison avec et hors régulation en température

La dérive linéaire de la fréquence au cours du temps a été corrigée.
Les mesures ont lieu successivement avec et sans régulation en température.

On a d'abord mesuré la fréquence pendant 48h avec la régulation en pression et la régulation en température en marche. Pour cette série, le climat fut très ensoleillé et clair, et le système a donc subi de fortes variations de la température diurne/nocturne, avec une différence maximale de 10 degrés à l'extérieur. Le résultat est donné en **figure 30**.

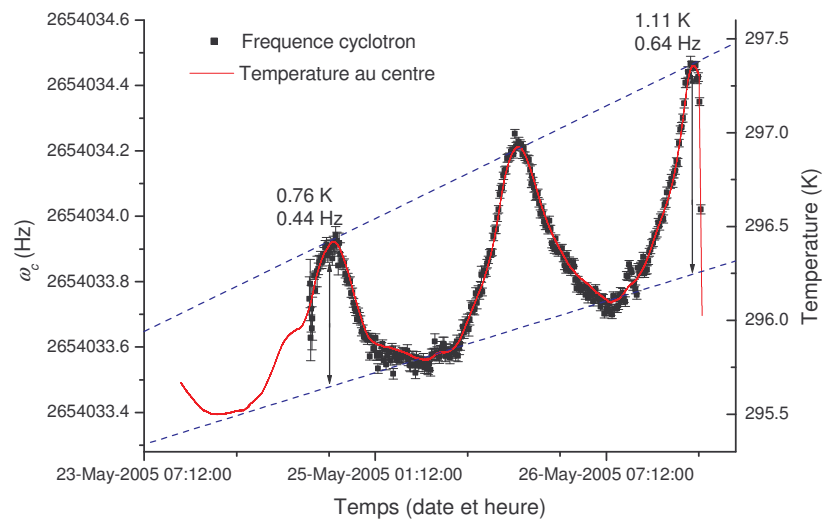


FIG. 30 Régulation en température avec une consigne trop basse

Zoom sur la première partie de la figure 29 : la consigne en température est trop basse pour que la régulation s'effectue correctement. La température moyenne au centre de la colonne augmente au fil des jours avec la température extérieure.

On peut voir que le système n'est pas correctement régulé car la consigne en température n'était plus adaptée. Ceci est dû en partie à des problèmes de ventilation dans le hall d'expérience qui ont accentué les différences de température enregistrées auparavant et servant de base à la régulation. Les oscillations diurne/nocturne ont alors tendance à s'accroître. En outre, la température moyenne du système augmente au cours du temps avec la température extérieure.

Du 26 au 31 Mai (voir **figure 29**), la régulation de la température était éteinte et seule la régulation en pression fonctionnait. Il manque des mesures de la fréquence en raison d'un problème logiciel.

Enfin la dernière série de mesure fut effectuée avec la régulation de la température en marche munie d'une consigne correcte, et la régulation de la pression éteinte en **figure 31**.

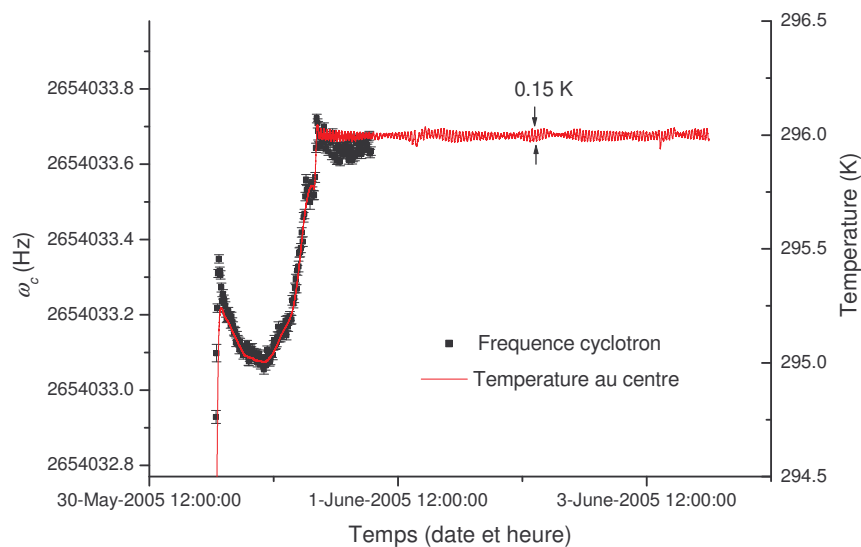


FIG. 31 Régulation de la température avec une consigne correcte

Zoom sur la dernière partie de la figure 29 : la consigne en température est correcte, donc le système est régulé. Les fluctuations de 0.15 K sont dues aux paramètres d PID qui ne sont pas encore réglés de manière satisfaisante.

3. Bilan et perspectives

Lors de ces trois premiers mois de projet, il fut possible de mettre techniquement en place les dispositifs de régulation pour la pression de l'hélium et pour la température du réservoir. Il fallut accorder un certain temps à la programmation, principalement sous LabView, afin de lire les données via le port GPIB et de suivre la régulation de la température sans interrompre le logiciel de lecture de la pression. Plusieurs réaménagements matériels furent nécessaires au cours de ce montage.

Il est probable que les arrangements temporaires soient remplacés dès que les réglages et les performances de ces dispositifs seront satisfaisants.

Les mesures de la fréquence cyclotron dans le piège de précision pour le spectre en temps de vol de ^{39}K ont permis de constater la corrélation de la fréquence avec la température, et son anticorrélation avec la pression. Les variations de la fréquence sont fortement marquées hors régulation (voir **figure 29** et **30**), confirmant bien ainsi les effets attendus.

Avant de pouvoir évaluer l'influence de cette régulation sur l'erreur systématique dans la mesure de la fréquence, il faut optimiser les paramètres de la régulation, et résoudre les conflits inhérents à l'exécution de deux programmes différents cherchant à accéder au même port GPIB.

C'est pourquoi les prochains objectifs de travail sont les suivants :

- Il est essentiel de déterminer si le flux actuel de l'air dans la régulation en température est suffisant au réglage correct des paramètres du PID. Les performances atteintes en poursuite lors des réglages du PID seront un bon indicateur de la qualité du flux.
- Pour le réglage en soi des paramètres du PID, il faut prévoir quelques semaines de tests.
- Il sera judicieux d'ajouter aux canaux du Keithley 2700 les signaux du capteur de température du type Pt100 et du manomètre capacitif de type Baratron[®]. Ce travail comportera une grande part de programmation visant à fusionner les programmes de lecture de la pression de l'hélium et de régulation de la température.

Par la suite, une étude systématique de l'erreur sur la mesure de la fréquence cyclotron pourra être effectuée à l'aide de la source de clusters de carbone d'ISOLTRAP. On pourra ainsi comparer la précision des mesures, avec et sans régulation.

CONCLUSION

Une solution semble avoir été apportée au problème de la dérive du champ magnétique sur le spectromètre de haute précision ISOLTRAP à ISOLDE, au CERN.

Le dispositif de stabilisation en température du piège de précision testé sur l'expérience SMILETRAP a pu être adapté à ISOLTRAP. Celui-ci est non seulement constitué d'un dispositif de régulation de la pression de l'hélium servant à refroidir le piège, mais il comporte également un système qui, insufflant de l'air chaud autour de la ligne de faisceau passant à travers le piège, permet de réguler la température au cœur du piège.

D'abord une étude des fluctuations de la température au niveau du piège et de la pression de l'hélium dans la ligne d'évacuation permet de confirmer les exigences du dispositif de régulation.

Puis, la mise en place technique des systèmes, tant au niveau mécanique que logiciel, a exigé une attention constante aux conséquences sur l'optimisation de la ligne de faisceau, puisque les délais de l'expérience imposèrent la réalisation entre deux périodes de temps de faisceau.

Enfin, l'optimisation des paramètres de la régulation et les tests lors de la mesure de masse de l'ion de référence ^{39}K ont révélé l'effet prédominant de la stabilisation en température par rapport à la stabilisation en pression sur la réduction des fluctuations de la fréquence cyclotron mesurée. Par conséquent, la régulation de la température du piège a donc bien permis de réduire les oscillations du champ magnétique dans le piège de précision.

Cependant, de nombreuses améliorations doivent encore être apportées. L'optimisation des paramètres de la régulation en température n'est pas terminée, ce qui devra être fait en priorité. D'autre part, un programme unique réalisant l'acquisition en pression et en température, ainsi que la régulation en température serait fort appréciable. Dès lors, une étude de la réduction de l'erreur systématique sur la mesure de la fréquence cyclotron pourra être envisagée.

Ces quelques mois de projet m'ont offert l'opportunité de découvrir le fonctionnement d'installations de haute précision au CERN. J'ai pu appréhender les techniques impliquées dans la spectrométrie de masse d'ions radioactifs. L'expérience du travail dans une collaboration internationale fut à la fois particulièrement stimulante et enrichissante.

Remerciements

Je tiens à exprimer toute ma gratitude envers mon responsable de stage Gilles Ban, ainsi qu'envers mon superviseur au CERN Pierre Delahaye, sans lesquels rien n'aurait été possible.

Un grand merci à Alexander Herlert et Klaus Blaum pour l'extrême efficacité avec laquelle ils ont encadré mon projet.

De la même manière, j'éprouve une reconnaissance toute particulière envers Chabouh Yazidjian et Romain Savreux qui furent tout simplement omniprésents à tous points de vue.

Le soutien d'Ulrike Hager, Michael Dworschak et Slobodan Djekic fut très précieux lors de la mise en place mécanique du système de régulation en température.

Je remercie également Fredrik Wenander et Bernard Crépieux pour leur aide ponctuelle mais indispensable.

Enfin, je ne saurais compter le nombre de personnes qui m'ont chaleureusement accueillis et guidés au CERN. *Tous mes remerciements à ceux que j'aurais oublié de citer et qui se reconnaîtront.*

Bibliographie

- [1] **J. Aystö**
(a) *CERN's longest serving experimental facility.*
Physics Reports 403-404 (2004) 459-469
(b) <http://isolde.web.cern.ch/ISOLDE/>
<http://www-ap.gsi.de/research/posters/isoltrap/index.html>
- [2] **F. Herfurt et al.**
A radiofrequency ion trap for accumulation, and emittance improvement of radioactive ion beams.
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 469 (2001) 254-275
- [3] **M. König et al.**
Quadrupole excitation of stored ion motion at the true cyclotron frequency.
International Journal of Mass Spectrometry and ion process 142 (1995) 95-116
- [4] **A. Kellerbauer et al.**
From direct to absolute mass measurements: A study of the accuracy of ISOLTRAP.
Eur. Phys. J. D 22, 53-64 (2003)
- [5] **M. Brodeur**
Temperature dependence of the magnetic field inside the precision Penning trap of the ISOLTRAP experiment.
Rapport interne Université de Manitoba (Canada) - CERN, 23 septembre 2004
- [6] **Pt100 platinum resistance thermometers**
<http://www.picotech.com/applications/pt100.html>
- [7] **T. Fritioff et al.**
Recent Progress with the SMILETRAP Penning Mass Spectrometer.
Hyperfine Interactions 132, 231-244 (2001)
- [8] **MKS Instruction Manuals**
(a) *MKS Type 627B Baratron[®] Temperature regulated Capacitance Manometer.*
(b) *MKS Type 250E Pressure Flow Controller.*
(c) *MKS Type 248A/B/C Control Valve.*
(d) *MKS HPS[®] Electromagnetic Cv valve.*
(e) www.mksinst.com
(f) MKS technical hotline.
- [9] **Keithley User's Manuals**
(a) *Model 2000 Multimeter/Switch System*
(b) *Model 2700 Multimeter/Switch System*

- [10] **Analog Devices Rev.C**
Two-Terminal IC Temperature Transducer AD590
www.analog.com
- [11] **C. Yazidjian**
(a) *The optimization procedure of ISOLTRAP.*
Rapport interne ISOLTRAP-CERN, Novembre 2003
(b) *Simulation et caractérisation d'un détecteur Channeltron pour des mesures de masse au CERN avec ISOLTRAP (2,3,4).*
Rapport de stage de DEA, Juillet 2003
- [12] **R. Savreux**
Etude de la technique de refroidissement d'ions "Rotating Wall Cooling" avec le piège de Penning REXTRAP/REX-ISOLDE (2).
Rapport de stage de DEA, Juillet 2004