# Benjamim FURTADO MORENO

Simulations de transport et piégeage d'ions anti-hydrogène pour l'expérience GBAR Laboratoire Kastler Brossel

Tour 13/23 - 4, place Jussieu - 75005 PARIS

Tuteur de stage : Jean-Philippe Karr

Janvier 2019

#### **INTRODUCTION AU RAPPORT**:

• <u>Présentation du Laboratoire</u> :

Le Laboratoire Kastler Brossel porte le nom de ses deux fondateurs : Alfred Kastler, Prix Nobel de Physique en 1966 pour ses travaux sur « la découverte et le développement de méthodes optiques pour l'étude de résonances hertziennes dans l'atome », et Jean Brossel. En 1951, ces deux hommes ont décidé de s'associer après s'être rencontrés au Département de Physique de l'ENS (École Normale Supérieure), et ont fond le Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne de l'ENS, qui prit le nom de Laboratoire Kastler Brossel jusqu'en 1994.

Aujourd'hui, il est dirigé par Antoine Heidmann depuis 2012, et ses principales activités sont dans le domaine de la physique quantique (étude de gaz d'atomes froids, optique et optimécanique quantique, mesure de haute précision dans les atomes, ions ou molécules, etc). Le laboratoire est composé de 12 équipes travaillant dans différents domaines, dont certaines travaillent sur des grands projets en collaboration avec d'autres laboratoires dans le monde, dont le projet GBAR, au CERN. C'est, de ce contexte que s'insère le sujet de mon stage.

• <u>Objectifs du stage et travail réalisé</u> :

Mon sujet de stage consistait à simuler une partie du montage de l'expérience GBAR (Gravitational Behavior of Antihydrogen at Rest). L'objectif était de vérifier si, et dans quelles conditions, le montage conçu permet de transporter des ions anti-hygrogène ( $\overline{H}$ ) depuis la chambre de réaction où ils sont produits, jusqu'au piège où ils devront être refroidis avant de réaliser une expérience de chute libre. Mon travail consistait à réaliser des simulations numériques de ce montage à l'aide du logiciel SIMION, et servira de base pour de futures simulations plus détaillées, puis pour la mise en œuvre expérimentale au CERN.

#### <u>LE STAGE EN SOI</u>:

### • <u>Le projet GBAR</u> :

L'objectif de ce projet est d'observer le comportement d'un  $\overline{H}$  en chute libre dans le vide. L'expérience peut être décomposé en 4 étapes principales :

1. Production d'un ion H positif, composé d'un antiproton et de deux positrons. Cela se fait grâce

à deux réactions successives entre des antiprotons (produits dans un accélérateur de particules puis ralentis) et des atomes de positronium (atome constitué d'un électron et d'un positron).

- 2. Transport de l'ion anti-hydrogène jusqu'à un piège à ions.
- 3. Refroidissement de l'ion.

4. Photo-détachement d'un positron par laser, pour obtenir un atome de  $\overline{H}$  neutre et au repos qui, n'étant plus piégé, va commencer à tomber. L'équipe de recherche dans laquelle j'ai effectué mon stage, qui est co-responsable du piégeage et du refroidissement des ions, souhaitait étudier ce qu'il se passe depuis le moment de la formation des ion jusqu'à leur injection dans le piège. On s'est donc intéressés au chemin qui devrait prendre le faisceau d'ions. Le montage est représenté par les figures :



 Figure 1 : Photo du montage. Les Antiprotons utilisés dans l'expérience arriveront du p drift tube. La où il est marqué «Riken Trap» et «Buffer Gaz» c'est la partie transportant les positrons . Le mot «reaction» indique la chambre de réaction ([2])



-Figure 2 : Zoom sur la partie encadrée en blanc dans la Figure 1. Ici on peut voir les électrodes mises en jeu ainsi que les valeurs possibles pour chacune.

Le faisceau partira donc de la chambre de réaction(où les ions sont créés), passera dans le microwave setup, le SW (**sw**itchyard, l'aiguillage qui servira à mener le faisceau dans le bon tube séparant ainsi les ions des antiprotons et des atomes de  $\overline{H}$  neutres), et le tube à ions  $\overline{H}$ . Toute cette partie est déjà installée au CERN. Ensuite, il est prévu d'installer un premier déflecteur qui servira à injecter d'autres espèces ioniques dans le piège, un deuxième tube moins long servant à ralentir les ions et finalement un dernier déflecteur qui fera dévier le faisceau dans le piège où on pourra refroidir les ions, pour ensuite faire l'expérience.

#### • <u>SIMION</u> :

SIMION est le logiciel qui m'a servi d'outil de travail pendant la durée du stage. Pour l'utiliser, la première étape consiste à dessiner les électrodes du montage en écrivant un "geometry file" (programme écrit dans un langage spécifique à SIMION). A partir de ce fichier, SIMION calcule ensuite le carte du potentiel créé par chaque électrode sur la grille de points dans laquelle on veut réaliser la simulation. Pour cela il résout l'équation de Laplace ( $\Delta V = 0$ ) avec les bonnes conditions aux limites. Une fois connue cette carte de potentiel, SIMION simule la trajectoire d'un faisceau d'ions en intégrant les équations du mouvement. . Je dois aussi préciser que, pour traiter des montages sur SIMION, il faut d'abord définir l'espace dans lequel sera réalisée la simulation (on précise trois tailles selon les axes x, y et z, cet espace ne peut être que parallélépipédique), ainsi que le pas de la grille sur laquelle le potentiel est calculé (1 pas par mm dans notre cas). Traiter le montage entier (depuis la chambre de réaction jusqu'au piège) en une seule simulation nécessiterait un espace 3D gigantesque, ce qui donnerait un tableau de potentiel trop grand pour la mémoire de l'ordinateur. On a donc dû séparer nos simulations et montage en 2 parties : de la chambre de réaction jusqu'à l'entrée du tube à ions H, puis la suite du montage, en prenant comme conditions initiales les conditions finales de la première simulation.

• <u>Première simulation: de la chambre de réaction à l'entrée du tube</u>



 Figure 3 : Zoom et vue en perspective de la Figure 2. Ici il n'est représenté que la partie allant de la chambre de réaction au «SW».Cette figure montre un essai dans cette première simulation.Le trait noir est la représentation du faisceau d'ions par SIMION.



- Figure 4 : Vue de profil de l'essai fait en Figure 3 permettant de mieux voir la trajectoire du faisceau

La toute première chose que j'ai fait ici, c'était de faire voler un ensemble de particules, représentant le faisceau d'ions (NB. j'ai désactivé l'interaction coulombienne entre les ions, car en pratique on s'attend à produire un seul ion. Faire voler un grand nombre d'ions simultanément est un moyen pratique de visualiser la dispersion des trajectoires) et de jouer sur les valeurs de potentiel à appliquer aux électrodes du SW pour le faire aller dans le bon tube, en partant des valeurs indicatives mentionnées dans la Figure 2 (ces valeurs ont été estimées par les chercheurs participant au projet)

Les conditions initiales de cette simulation (provenant d'estimations faites par d'autres chercheurs de la collaboration GBAR) sont résumées dans le tableau ci-dessous.

- énergie cinétique moyenne: 10 keV
- dispersion d'énergie: 100 eV
- dispersion de position: 2 mm
- divergence(demi-angle): 10 mrad
- dispersion de temps de création: 75 ns

La valeur de 10 keV choisie pour l'énergie cinétique moyenne correspond à l'énergie jusqu'à laquelle sont décélérés les antiprotons dans la version actuelle du montage (les ions produits gardent en effet essentiellement la même énergie que les antiprotons incidents). La valeur utilisée à terme devrait être comprise entre 1 et 6 keV. Il faudra alors répéter les simulations dans ces nouvelles conditions.

Un point très important est la dispersion d'energie de 100 eV, qui correspond aux caractéristiques attendues de l'anneau de décélération d'antiprotons. On peut remarquer que cette valeur est beaucoup plus grande que la profondeur du puits de potentiel d'un piège à ions typique, et ne permettra donc pas une injection efficace. Il est prévu à l'avenir de piéger et refroidir préalablement les antiprotons pour réduire leur dispersion d'énergie à environ 1 eV. De nouveau, les simulations devront être refaites dans ces nouvelles conditions.

J'ai remarqué que les grosses électrodes (1 et 2) avaient une influence plus importante que les petites (3 et 4) dû à un potentiel imposé plus important, donc c'est sur ces électrodes que j'ai fait varier les valeurs du potentiel. J'ai commencé par ajuster les potentiels des électrodes 1-2 et 3-4 (voir Figure 2) de manière à ce que le faisceau d'ions soit le mieux centré possible par rapport au tube, et le plus parallèle possible à l'axe du tube. Les valeurs optimales du potentiel obtenues pour chaque électrode ont éte:

1000V et -1000V pour les électrodes 3-4 respectivement;

1325V et -1325V pour les électrodes 1-2 respectivement;

La méthode utilisée extraire ces caractéristiques du faisceau, et les injecter dans la simulation de la suite du montage, est la suivante: j'ai ajouté une électrode fictive à mi-chemin entre les éléments notés L1 et L2 sur la Figure 2. Les ions terminent donc leur trajectoire en s'écrasant sur cette électrode, comme on peu le voir sur la Figure 4.

SIMION permet d'enregistrer les caractéristiques de chaque ion à la fin de sa trajectoire (position, énergie cinétique, direction du vecteur vitesse). Ces données sont importées sous Excel afin de calculer les valeurs moyennes et écarts type de ces différentes quantités. Une fois cet alignement effectué, j'ai étudié la focalisation du faisceau, qui est ajustée à l'aide des électrodes notées L0 sur la Figure 2. Il s'agit d'une lentille de Einzel, qui est un ensemble de 3 électrodes cylindriques (voir Figure 5 ci-dessous), assez rapprochées, auxquelles on applique une tension à l'électrode du milieu et on laisse celles à l'extrémité à un potentiel nul. On a ainsi un champ électrique entre les 2 premières électrodes, puis un champ opposé entre les 2 dernières. Chaque zone de champ électrique dévie la trajectoire des ions, de façon similaire à un dioptre en optique. Dans cette configuration, l'effet global est toujours un effet de lentille convergente, quel que soit le potentiel appliqué à l'électrode centrale. Contrairement aux lentilles optiques, il n'existe pas de formule simple permettant de calculer la distance focale d'une lentille de Einzel en fonction de sa géométrie et de la tension appliquée. Les simulations numériques sont nécessaires pour effectuer le réglage.



- Figure 5: Figure décrivant le comportement d'un faisceau traversant une lentille de Einzel, donc, son fonctionnement



Figure 6: Variation du point de convergence du faisceau en fonction de la variation du valeur du potentiel appliqué à la lentille. f est la distance focale et D est le diamètre d'ouverture de la lentille ([5])

Le critère que j'ai appliqué pour régler la lentille de Einzel a été d'obtenir un faisceau aussi parallèle que possible en sortie. En effet nous pensions qu'un faisceau parallèle serait le plus facile à manipuler dans la suite du montage. J'ai donc testé plusieurs valeurs de la tension appliquée à la lentille L0, en cherchant à minimiser la divergence angulaire. Au cours de cette étude j'ai remarqué que le point de focalisation du faisceau était différent selon les axes horizontal (dans le plan de la Figure 4) et vertical (perpendiculaire à la Figure 4). Cela est dû aux électrodes déflectrices 1-4, qui imposent un champ horizontal et ont un effet de lentille selon cette direction uniquement.



Les résultats sont représentés figure 7

- Figure 7: Représentation de la divergence des différents angles en fonction de la valeur de potentiel appliquée à la lentille L0

Au vu de ces résultats nous avons décidé de prendre une valeur de 3000 V pour le potentiel de cette lentille, qui représente un bon compromis entre divergence horizontale et verticale.

J'ai alors récupéré les caractéristiques du faisceau d'ions au point de référence choisi (à mi-chemin entre L1 et L2), qui m'ont servi de conditions initiales pour la suite de la simulation, c'est-à-dire, le chemin dans le tube et après le tube. On est donc partis avec les conditions initiales suivantes :

- dispersion de position de 7mm

- divergence angulaire de 0,37°

- les dispersions en énergie et en temps sont inchangées par rapport à la première simulation.

#### • Deuxième simulation : du tube au deuxième déflecteur

Pour cette deuxième simulation, il m'a fallu ajouter les éléments se situant après le tube, cette partie du montage n'ayant encore jamais été simulée. J'ai donc ajouté dans le fichier définissant la géométrie des électrodes les éléments suivants:

#### - 1. Premier déflecteur quadripolaire

(Le principe de fonctionnement en détails de cet élément sera expliqué dans le paragraphe concernant la troisième simulation.) Ici, son rôle n'est pas de dévier la trajectoire des ions  $\overline{H}$ , mais d'injecter par les deux voies latérales des ion d'autres espèces (Be<sup>+</sup> et HD<sup>+</sup>) qui serviront à refroidir les ions  $\overline{H}^+$  par refroidissement sympathique. Pour cette simulation, toutes les électrodes de ce déflecteur sont donc à 0V et il n'a aucun effet sur les ions. Par contre il est important de bien focaliser le faisceau pour qu'il puisse traverser ce déflecteur sans pertes.

#### - 2. Tube de décélération

La décélération des ions est nécessaire en vue de leur injection dans un piège. En principe, elle pourrait se faire directement au moment de l'injection, en polarisant toutes les électrodes du piège à une tension proche de l'énergie cinétique des ions incidents. Cependant, à des valeurs aussi élevées que 10 kV, cela pose de grosses difficultés techniques, d'où le choix d'une décélération préliminaire des ions.

On utilise donc un tube porté à une tension de 9 kV, qui va ralentir les ions jusqu'à 1 keV. Par contre, si les électrodes situées après le tube sont à ,0V, les ions vont être ré-accélérés. La solution consiste à commuter la tension du tube de 9 kV à 0 V pendant que les ions sont à l'intérieur (de préférence au milieu) du tube: ils se trouvent alors dans un zone de potentiel uniforme, donc de champ électrique nul, et la commutation de tension n'a aucun effet sur eux. Remarque: cette valeur de 1kV est préliminaire, la valeur envisagée dans le montage final est de 300 V.

# - 3. Deuxième déflecteur

Le rôle de cette élément est de faire tourner les ions de 90° pour les injecter dans la chambre à vide où se situe le piège à ions et où sera effectuée l'expérience de chute libre (voir la troisième simulation pour plus de détails sur cette étape).

Le schéma du montage est représenté en Figure 8.

Après avoir ajouté ces éléments, j'ai pu commencer mes simulations. Il m'a tout d'abord fallu refocaliser le faisceau le plus efficacement possible, en jouant sur les tensions appliquées aux lentilles de Einzel, afin que les ions traversent ces trois éléments avec un minimum de pertes. Nous pensions initialement qu'il suffirait d'utiliser les deux dernières lentilles (L4 et L5). Mes premiers essais ayant été infructueux, j'ai alors décidé d'utiliser toutes les lentilles disponibles (L2 à L5) et j'ai fini par obtenir une injection satisfaisante des ions dans le tube de décélération (voir Figure 10).



- Figure 8: Représentation des éléments rajoutés dans le montage sur SIMION



-Figure 9: Vue en perspective de ce qui est représenté en Figure 8. Le premier déflecteur est manquant



 Figure 10: Image montrant un essai dans la partie contenant les éléments ajoutés. On voit que la traversée du faisceau dans le premier déflecteur est réalisé sans perte d'ions (Remarque: j'ai oublié d'enlever le curseur au moment de la prise de l'image, ce qui gêne un peu la vue)

J'ai alors pu mettre en œuvre le tube de décélération, c'est-à-dire ajouter dans la simulation la commutation de tension ("switch" en anglais) de 9 kV à 0 kV "au bon moment", en introduisant une nouvelle variable dans mon programme, t\_switch, qui déterminerait le temps auquel la commutation serait effectuée . Pour trouver l'optimum sur t\_switch, la méthode a consisté à importer sous Excel la vitesse finale des ions et à calculer la vitesse finale moyenne. En effet si le switch a lieu trop tôt, les ions ne seront pas ralentis; s'il a lieu trop tard, ils seront ralentis mais ré-accélérés à leur sortie. On s'attend à avoir une petite plage de valeurs où la vitesse finale est minimale. C'est ce qu'on observe Figure 11. Au vu de ces résultats j'ai choisi la valeur t\_switch =  $3.4 \mu s$ .



- Figure 11: Résultats obtenus pour le choix d'une valeur de t\_switch convenable

Une fois la décélération mis en oeuvre, on constate que la divergence du faisceau augmente très nettement (en effet le tube de décélération a un effet analogue à une lentille) ce qui engendre des pertes importantes à l'entrée du deuxième déflecteur. J'ai cherché à minimiser ces pertes en refocalisant le faisceau grâce aux les deux lentilles intégrées au premier déflecteur (une à l'entrée, une à la sortie, chacune constituée de 2 électrodes), mais sans trouver de solution satisfaisante.

On peut en déduire que la stratégie suivie lors de la première simulation (chercher à avoir un faisceau parallèle à l'entrée du tube) n'était probablement pas optimale car ce faisceau parallèle est déjà très élargi à cause de la dispersion d'énergie des ions. Il faudrait reprendre la première simulation et focaliser davantage le faisceau dès la création des ions en jouant sur toutes les lentilles disponibles, en commençant par L0 et L1.

On peut aussi remarquer que ce problème de dispersion du faisceau est lié à la dispersion d'énergie de 100 eV. Sa réduction est prévue à 1 eV, nécessaire pour une bonne efficacité d'injection dans le piège (voir partie suivante), devrait rendre le faisceau beaucoup plus facile à manipuler. Malgré tout, il pourrait être nécessaire de rajouter une lentille de Einzel à la sortie du tube pour refocaliser le faisceau.

#### • Troisième simulation: virage et injection dans le piège

Pour cette dernière étape du parcours des ions, j'ai pu étudier le principe de l'injection dans le piège, mais pas véritablement sa mise en œuvre dans GBAR (en effet, comme on l'a vu précédemment, les pertes à l'entrée du deuxième déflecteur sont encore trop importantes).

La virage des ions est réalisée grâce aux 4 électrodes courbées (voir figure 12) qui permettent de réaliser en bonne approximation un potentiel quadrupolaire (proportionnel à  $x^2$   $y^2$ ). Lorsque ces électrodes sont portées à un potentiel égal à l'énergie cinétique des ions incidents (50 eV dans le cas présent) cela fait tourner les ions de 90°.

Le piège à ions est porté à une tension proche de l'énergie cinétique initiale des ions, de façon à les ralentir suffisamment pour qu'ils restent piégés (leur énergie cinétique résiduelle doit être plus petite que la profondeur du puits de potentiel du piège). Il faut donc ajuster assez précisément la tension de polarisation du piège Ubias. L'énergie cinétique initiale des ions ayant été fixée à 50 eV pour ce test, le piégeage fonctionne pour Ubias autour de 48V.

De plus pour faire entrer les ions, le piège doit être initialement "ouvert" c'est-à-dire qu'aucun potentiel n'est appliqué à l'électrode "endcap" d'entrée (en dehors de la polarisation Ubias). Puis il faut "fermer" le piège à un instant t\_block bien choisi en augmentant de quelques volts la tension appliquée à cette électrode. A noter que lorsqu'on veut appliquer des tension dépendant du temps dans SIMION, cela nécessite l'écriture d'un programme dans un langage appelé LUA. J'ai pu trouver une valeur de t\_block permettant de piéger les ions incidents.

Enfin, j'ai étudié qualitativement la tolérance de l'injection vis-à-vis des conditions initiales (position et direction de la vitesse de l'ion). La tolérance sur la position initiale est de l'ordre de 1mm, et la tolérance angulaire sur la direction est de l'ordre de 1.25°. Cette étude sera utile pour optimiser en amont les caractéristiques du faisceau d'ions afin de les injecter le plus efficacement possible.



- Figure 12: Image montrant un essai dans la 3<sup>ème</sup> simulation, où on peut voir que la particule se fait piéger

• <u>Le piège à ions</u> :

C'est un piège de Paul linéaire, constitué d'électrodes mises à des potentiels bien spécifiques, permettant ainsi que les ions soient bornés par des barrières (de potentiel), leur confinant dans l'espace délimité par ces dernières. Le piège de Paul ressemble à ceci :



- Figure 13: Représentation du piège par SIMION

On voit qu'il y a 4 électrodes cylindriques en tout, et elles sont identiques 2 à 2 selon les diagonales. Il y a d'une part les électrodes RF (radiofréquence) non segmentées auxquelles est imposé un potentiel dépendant du temps (il s'écrit V =  $V_0 cos(\Omega t)$ ) et les restantes sont segmentées en 3 dans le but d'appliquer une tension constante (et la même) aux bouts, les électrodes End, créant ainsi une différence de potentiel avec le segment central dont le potentiel est nul.

Quant au mouvement des particules dans le piège, il se décompose en un mouvement forcé à la pulsation  $\Omega$  (micromouvement) et un mouvement d'oscillation plus lente et de plus grande amplitude (macromouvement) et le potentiel est de la forme :

 $\underline{\Phi = V_0 \cos(\Omega t)(x^2 - y^2) / 2R^2} \text{ (dans notre cas, R=3,5 mm, } V_0 \sim 50V \text{ et } \Omega \sim 30\pi \text{ MHz}\text{)}.$ 

Dans la limite où la fréquence du macromouvement est beaucoup plus petite que celle du micromouvement, on peu faire l'approximation adiabatique qui consiste à calculer l'effet moyen du champ crée par les électrodes RF sur le macromouvement. On montre alors que le macromouvement a lieu dans le pseudo-potentiel (radial), donné par

 $\underline{\Phi_{r} = M (\omega_{x}^{2} x + \omega_{y}^{2} y) / 2}, \quad \text{où } \omega_{x} \text{ représente la fréquence du macromouvement et } \omega_{y} \text{ celle du micro mouvement et } M \text{ la masse de l'ion. Cependant ici, on n'est qu'à 2 dimensions. Pour en avoir les trois, il faut introduire le potentiel axial <math display="block">\underline{\Phi_{z} = M\omega_{z}^{2} [z^{2} - (x^{2} - y^{2}) / 2] / 2} \text{ et on obtient donc le potentiel effectif total régnant dans le piège :}$ 

$$U_{\rm eff} = M \left[ \omega_z^2 z^2 + (\omega_x^2 - \omega_z^2/2) x^2 + (\omega_y^2 - \omega_z^2/2) y^2 \right] / 2 \qquad ([1], [4])$$

#### En Français

Les principaux résultats que j'ai obtenus lors de ce stage sont les suivants:

- sur la première partie du montage ("switchyard" ou aiguillage), j'ai déterminé des valeurs de tensions optimales pour un bon alignement du faisceau d'ions anti-hydrogène;

- sur la 2ème partie du montage, j'ai travaillé sur la focalisation du faisceau et obtenu qu'il traverse sans pertes le premier déflecteur, puis le tube décélérateur. Ces résultats doivent encore être améliorés car on a des pertes importantes à l'entrée du deuxième déflecteur;

- sur la dernière partie (injection dans le piège à ions), j'ai estimé la tolérance de l'injection vis-à-vis des conditions initiales.

Après tout le travail que j'ai effectué, ce stage m'a permis d'avoir une expérience des travaux que réalisent les chercheurs lorsqu'ils travaillent sur ce genre de projets et doivent faire des simulations avant d'aller expérimenter. De ceci, j'ai appris que le numérique, finalement, joue un rôle plus important que je ne l'imaginais dans le monde scientifique. Le stage m'a également permis de travailler avec des outils complètement nouveaux et à m'adapter quand même assez rapidement. En bref, j'ai fait un pas de plus vers le monde du travail scientifique.

Concernant l'avancée du projet GBAR, en ce moment, le CERN, où les antiprotons sont produits et où les derniers éléments du montage doivent encore être installés, est fermé pour des améliorations et ne rouvrira que d'ici 2 ans. D'ici là, les équipes continueront à travailler sur les différents points du projet dans les différents laboratoires un peu partout dans le monde, et dès la réouverture, la manipulation sera effectuée.

#### En Anglais

Over these 3 weeks, in which I've been doing my internship at Laboratoire Kastler-Brossel, I worked on SIMION, a software which function is to calculate the electric potential, at any point of space. First, it solves the Laplace equation for the electrodes displayed in the program file. Then it uses that data to solve the motion equations of the particles we want to make tests with and afterwards it calculates the particle trajectory in a three-dimensional space (defined and set earlier by the user). The goal with it was to simulate the trajectory that the particles used in our experiment would take, providing information for the real trials conditions.

The experiment I talked about is related to the GBAR (Gravitationnal Behaviour of Antihydrogen at Rest) project, which the aim is to look at how a ion of Antihydrogen shall behave in the vacuum.

This led me to learn how to work with this tool (SIMION), to write programs and make them be successfully understood by the software, and essentially to make many simulations related to the experiment's accessories real display, thus giving us reallistic data about the conditions the experiment should undergo.

As for the experiment itself which my hosting team was working in, it consists in correctly leading the Antihydrogen ions from the reaction chamber where they are created to a trap, where they are decelerated and then controlled, in order to make them, at last, go on a free fall in a vacuum chamber, where their behavior will be observed.

During my internship period I could lead the ions pretty far (in the simulation), not until the trap, but I could make them follow the right path properly and make them exit a long tube, which was the most important element in this ions guiding step, just as they should.

Now, talking about the project, it is being studied and tested through many subexperiments, such as the one I worked on, and progressivelly being led forth. All these subexperiments should be put in practice together in two years from now, at CERN, when the maintenace and upgrade it is undergoing at the moment is finished.

# **BIBLIOGRAPHIE**:

[1] Rapport de stage de M2, Simulation Numérique de Nuages d'ions piégés sur GPU, NicolasSillitoe (2014)

[2] Rapport GBAR, M.Charlton et al., AD-7/GBAR status report for the 2019 CERN SPSC (2019)

[3] Revue Hyperfine Interactions, vol 248 page 141, (2014)

[4] Charged Particles Traps, F.G.Major et al., Springer (2005)

[5] Applied Charged Particle Optics, H.Liebl, Springer (2008)