

Louis-Alexandre Bérubé (111 097 019)

*Physique des particules*  
*PHY-3501*

Projet  
Structure des accélérateurs linéaires

Travail présenté à  
Monsieur Luc Marleau

Département de physique, de génie physique et d'optique  
Université Laval  
Mercredi le 5 avril 2017

## Table des matières

1. Introduction .....	3
Qu'est-ce qu'un accélérateur linéaire .....	3
2. La structure de l'accélération .....	3
Moyen 1 .....	3
Moyen 2 .....	5
À l'intérieur de la géométrie.....	7
Quadripôle à radiofréquence.....	8
3. La structure du tube à dérive de l'accélérateur linéaire .....	10
Les concepts de base du tube à dérive .....	10
Structure des tubes à dérive .....	12
Ensemble de cellules de cavité.....	14
4. Conclusion.....	15
5. Références .....	16
Sites internet:.....	16
Documents:.....	16

# **1. Introduction**

## **Qu'est-ce qu'un accélérateur linéaire**

Un accélérateur linéaire est un appareil qui fait en sorte d'accélérer des particules chargées pour fournir de l'énergie cinétique. De plus, son but est de produire des réactions avec la matière. Les particules utilisées sont des électrons, des positrons, des protons ou bien des ions lourds. On peut retrouver les accélérateurs linéaires en médecine dans les domaines de radiodiagnostic et de radiothérapie. Dans ce genre d'applications, ce sont les rayons-x qui sont utilisés sur le patient pour retrouver une tumeur, par exemple. Également, l'accélérateur linéaire est utilisé dans les industries se servant des rayonnements ionisants ou des rayons-x en haute énergie. Dans ce projet, la structure de l'accélération et les concepts du tube à dérive de l'accélérateur linéaire seront abordés.

## **2. La structure de l'accélération**

Tout d'abord, la construction de la structure accélératrice ne se fait pas par un seul moyen, il en existe plusieurs. Lors de la construction de cette structure, les scientifiques recherchent une excellente efficacité énergétique.

### **Moyen 1**

Un des moyens est d'avoir un ensemble de cavités indépendantes courtes excitées dans un mode  $TM_{010}$  de la Figure 1 ci-dessous.

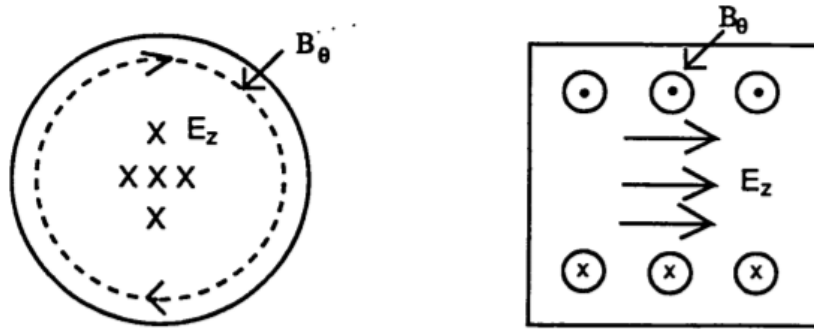


Figure 1 : Le champ électrique et magnétique dans la cavité cylindrique de la  $TM_{010}$ <sup>1</sup>

Chaque cavité est contrôlée par son propre générateur et chaque phase fournit une accélération continue sur toute la longueur de l'accélérateur. Ce moyen, qui est utilisé surtout pour l'accélération d'ions lourds supraconducteurs, possède deux avantages. Le premier avantage est la flexibilité à faire varier le profil de la vitesse synchrone pour plusieurs ions chargés et masses différentes tout en modifiant la phase des cavités. Le second avantage est la flexibilité à optimiser les réglages d'amplitude des cavités en fonction de leur niveau de performance.

Par contre, il existe un désavantage important à la cavité indépendante. Cet inconvénient est la complexité opérationnelle du réglage des phases et des amplitudes de chaque cavité. Il existe d'autres moyens, comme utiliser une structure d'accélération du guide d'onde, en supposant que l'onde  $TM_{01}$  reste mobile, et utiliser une cavité multicellulaire électromagnétique constitué de cellules couplées dans des modes résonnants  $TM_{010}$  excités.

Par exemple, au Centre de l'accélérateur linéaire de Stanford (SLAC), la structure de propagation des ondes a été utilisée pour un accélérateur électronique à 50 GeV. Cette méthode serait d'injecter une onde électromagnétique  $TM_{01}$  dans un guide d'ondes cylindrique. Le problème de cette méthode n'assure pas une accélération continue, car la vitesse de phase dépasse toujours la vitesse de la lumière. Pour ce faire, il est nécessaire d'avoir une structure plus complexe pour abaisser la vitesse de phase. Au SLAC, ils se sont assuré que les électrons aient une énergie élevée en ayant une structure composée d'une guide cylindrique avec un réseau périodique de disques conducteurs avec des trous axiaux (voir Figure 2).

<sup>1</sup> <http://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-93-0805>

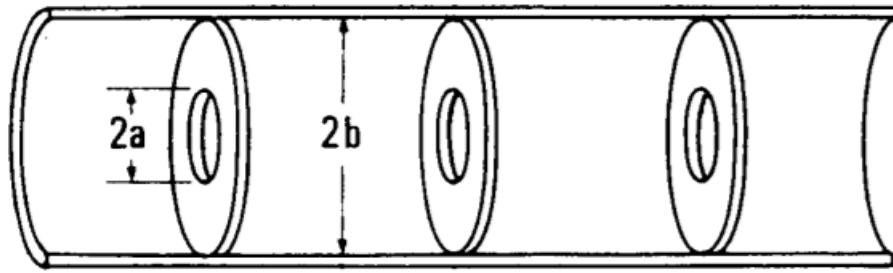


Figure 2: Structure de la propagation de l'onde d'un iris chargé<sup>2</sup>

La propagation de l'onde vers le bas de la structure dépend de l'interférence constructive entre l'onde incidente et les ondes réfléchies des disques.

## Moyen 2

Pour continuer, il y existe une autre méthode, utilisée dans les applications des électrons et des ions, qui consiste à exciter une onde stationnaire dans un réseau de cavité multicellulaire ou couplée. Cette procédure est commandée par un seul générateur d'ondes radioélectriques. L'utilisation de cette méthode évite la dissipation de puissance dans la charge et cela apporte une efficacité accrue. Les caractéristiques électriques sont expliquées en fonction du spectre des cellules résonnantes du mode  $TM_{010}$  couplées (voir Figure 3).

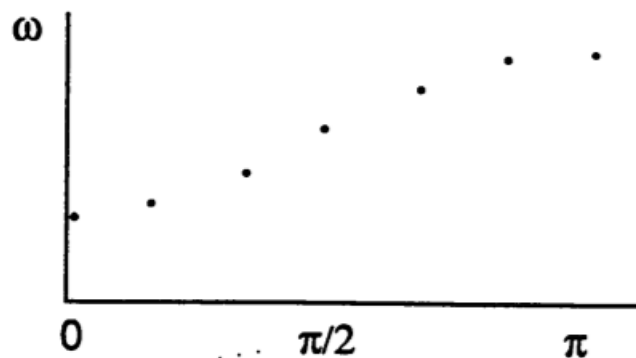


Figure 3: Le spectre du mode normal d'une chaîne de sept oscillateurs couplés tracée en fréquence<sup>3</sup>

Pour  $n$  cellules, il existe  $n$  modes de structure. Chaque mode est caractérisé par la répartition des amplitudes et des phases de cellule à cellule tout le long de la

<sup>2</sup> <https://cds.cern.ch/record/1542425/files/p253.pdf>

<sup>3</sup> <http://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-93-0805>

structure. Le spectre de fréquence de ces modes est centré sur la fréquence du mode  $TM_{010}$ , sans être perturbé par le couplage. La largeur de fréquence de ces modes augmente proportionnellement selon la force du couplage. Toutes les cellules ont la même amplitude et la même phase lorsque la fréquence est à son plus bas. Les modes sont identifiés selon l'avancement des phases de cellule à cellule, le mode le plus bas étant nommé le mode 0. Lorsque la fréquence est élevée, toutes les cellules ont la même amplitude, sauf les cellules adjacentes, ayant un décalage de  $\pi$ . Lorsque la plage de fréquence est moyenne, on retrouve le mode  $\pi/2$ .

D'une part, l'efficacité des structures d'ondes stationnaires en mode 0 ou le mode  $\pi$  est maximale, ce qui veut dire que les ondes qui se déplacent vers l'avant et vers l'arrière ont la même vitesse de phase que le faisceau contribuant à l'accélération. Il y a plus d'interférences entre les modes 0 et  $\pi$ . L'interférence entraîne une sensibilité de la distribution du champ au courant du faisceau et aux tolérances mécaniques. Plus il y a de cellules, plus la sensibilité augmente. Pour régler ce problème, le développement d'un couplage résonnant a été fait pour rendre l'opération des ondes stationnaires attrayante. Dans cette solution, la structure est démarrée électriquement dans le mode  $\pi/2$  quand l'espacement du mode est maximal. Il existe par contre une problématique; la géométrie est agencée de sorte que les cellules non excitées n'occupent aucun espace longitudinal le long de l'accélérateur, car le faisceau est influencé par les champs des cellules excités dans un intervalle en mode  $\pi$ . Même sans ce problème, l'efficacité reste excellente.

Un exemple est l'accélérateur linéaire de couplage latéral où les cellules non excitées sont placées hors axe et les cellules excitées ou accélérées sont sur l'axe et espacées d'une demi-période (mode  $x$ ). Au *Los Alamos Meson Physics Facility* (LAMPF), on utilise la structure à couplage latéral pour accélérer le faisceau de protons de 100 à 800 MeV. De plus, la structure couplée à l'axe, dont les cellules de couplage sont serrées le long de l'axe, fait en sorte que la distance entre les cellules accélératrices est la moitié d'une période de radioélectricité (mode  $\pi$ ). Dans ces deux exemples, la focalisation transversale peut être fournie par des lentilles quadripôles entre les réservoirs. Quand l'énergie est élevée, les contraintes de focalisation transversale sont souvent détendues et c'est normalement suffisant pour ce que les scientifiques recherchent. Les structures couplées à la cavité de l'accélérateur linéaire

sont adoptées pour les électrons et les protons quand la vitesse est supérieure à 0,4 fois la vitesse de la lumière, ce qui correspond à une énergie cinétique de près de 50 keV pour les électrons et 100 MeV pour les protons.

### **À l'intérieur de la géométrie**

La géométrie des cellules est modifiée à partir de la forme cylindrique ou du pylon en mettant des formes d'ogives sur les parois près de l'axe du faisceau. Les ogives produisent un effet capacitif sur le champ électrique au plan médian de la cellule et le long de l'axe. Lorsque la concentration est élevée au plan médian, cela augmente le taux d'accélération pour une puissance donnée dissipée et améliore donc l'efficacité du champ dans la production de l'accélération. On peut retrouver un désavantage aux formes d'ogives. Le champ électrique de surface est augmenté, alors cela peut causer une panne électrique. De plus, quand l'intensité est élevée, il peut y avoir une excitation accrue des modes élevés du faisceau.

Lors des vitesses élevées, la structure en mode P donne une efficacité supérieure comparativement au mode 0 fonctionnant à la même fréquence, parce que l'écart est plus petit. Aussi, ceci est dû à l'amélioration de l'effet du temps de transit avec deux cellules accélérées ou des intervalles par période d'ondes radioélectriques dans le mode x. Cependant, lorsque la vitesse est faible et que les cellules deviennent plus courtes, le nombre de parois d'extrémité par unité de longueur augmente et aussi, sur les parois finales, la dissipation de puissance totale domine. Il est préférable d'améliorer l'efficacité à faible vitesse dans le mode 0. Ensuite, les ogives deviennent des tubes à dérive qui sont soutenus par des tiges cylindriques. C'est le type de structure Alvarez qui se retrouve dans les tubes à dérive comme on peut le voir à la Figure 4.

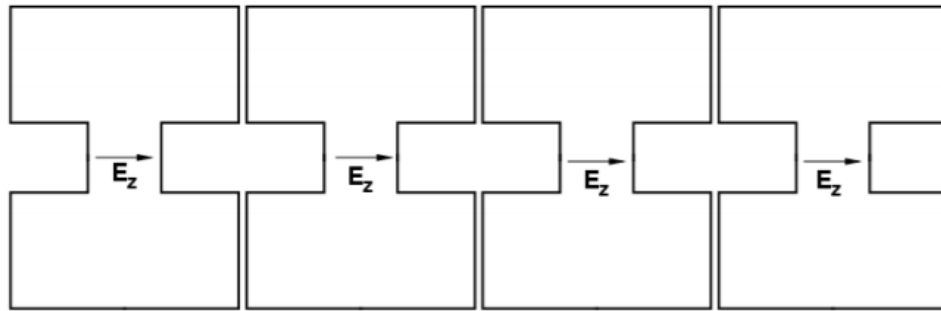


Figure 4: Structure du tube à dérive Alvarez<sup>4</sup>

Ce type de structure est souvent utilisé pour accélérer les protons et les ions qui se retrouvent dans une plage de vitesse près de 0,04 à 0,4 fois la vitesse de la lumière.

Les contraintes de focalisation transversale, qui sont meilleures à des faibles vitesses, sont fournies par des lentilles quadripôles magnétiques montées dans les tubes à dérive. On retrouve des trous ou des lentilles de focalisation dans l'espace interne du tube à dérive. Ce tube n'est pas utilisé pour les électrons, car ils ont une masse trop faible, alors la vitesse serait déjà au-dessus de l'intervalle de vitesse. En résumé, la vitesse est trop grande lorsque les électrons sont utilisés. Donc, les protons et les ions plus lourds ont besoin d'une structure plus complexe lorsqu'ils sont utilisés que les électrons avec leur structure plus simple.

### Quadripôle à radiofréquence

La plus récente structure construite pour des faibles vitesses est le quadripôle à radiofréquence (RFQ, abréviation anglaise; voir Figure 5).

<sup>4</sup> [http://uspas.fnal.gov/materials/11ODU/Proton\\_3.pdf](http://uspas.fnal.gov/materials/11ODU/Proton_3.pdf)



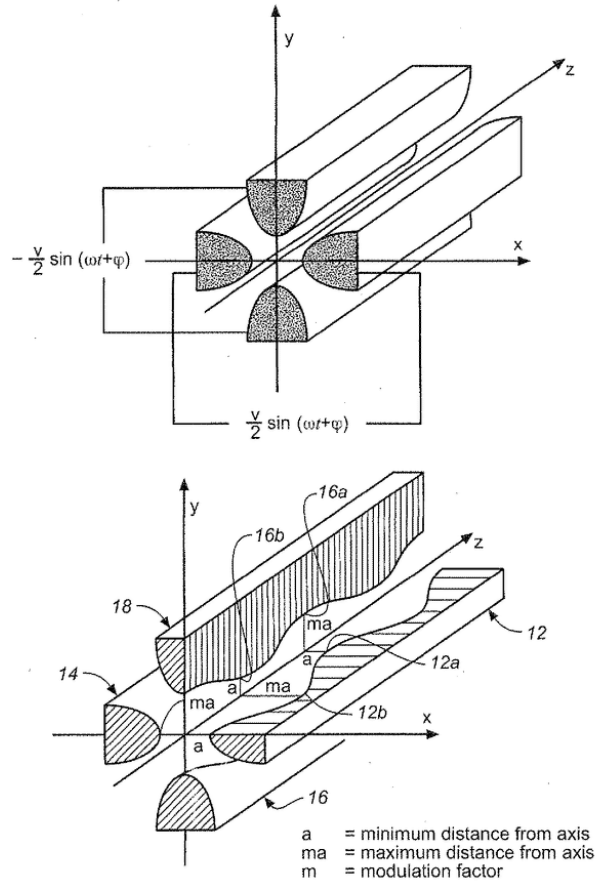


Figure 5: Le quadripôle à radiofréquence (RFQ)<sup>5</sup>

Dans cette structure, un mode quadripôle électrique est excité dans un résonateur à cavité chargé avec quatre tiges. Ils sont placés symétriquement près de l'axe du faisceau. Le champ électrique du RFQ donne une forte focalisation transversale électrique, ce qui est important pour les protons à faible vitesse et les ions plus lourds à cause de leur faible vitesse. Dans cette structure, 4 cannes et 4 ailettes sont utilisées et pour l'accélération, on introduit le modèle de modulation longitudinale sur ces éléments pour créer un ensemble de cellules accélératrices. Les grappes de la structure de la cellule RFQ améliorent la focalisation entre 0,01 et 0,07 ou plus de la vitesse de la lumière. Dans ce cas, il faut que l'efficacité de capture soit élevée, un faisceau continu qui accélère jusqu'à des énergies élevées pour l'injection dans le tube à dérive.

<sup>5</sup> <http://www.accelerators-for-society.org/about-accelerators/index.php?id=21>

### 3. La structure du tube à dérive de l'accélérateur linéaire

Il existe de nombreux concepts reliés aux structures d'un accélérateur linéaire. Seule la structure d'un tube à dérive sera abordée (voir Figure 6).

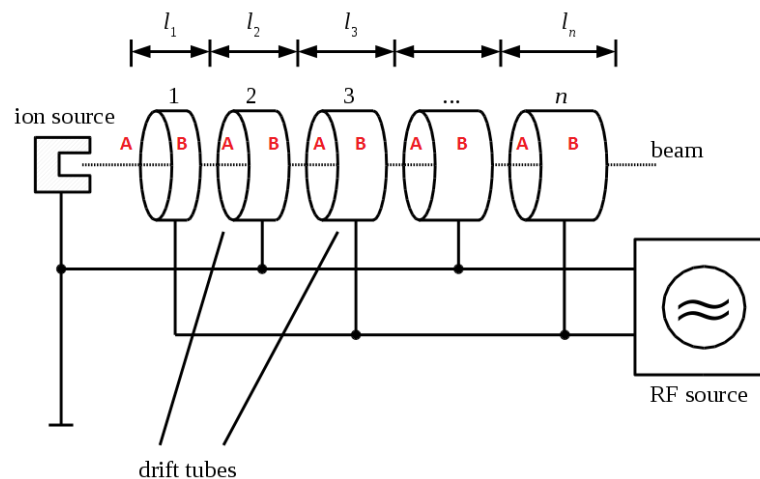


Figure 6: Schéma du tube à dérive dans un accélérateur linéaire<sup>6</sup>

#### Les concepts de base du tube à dérive

Tout d'abord, le tube à dérive, qui a été utilisé par Alvarez, consiste à installer des tubes à dérive conducteurs creux le long de l'axe dans lequel le champ électrique ne peut pas entrer (voir Figure 4). Dans cette méthode, les régions sans champ protègent le faisceau quand le champ électrique ralentit le faisceau. De plus, cela concentre le champ pour augmenter le facteur de temps de transit. Ces tubes sont divisés en plusieurs cavités de cellule mesurant près de  $\beta\lambda$ . Plus l'énergie augmente, plus la longueur des cellules augmentent. Pour chacun des tubes à dérive, ils sont chargés à l'opposé à chaque bout et les champs dans les cellules sont en phase. La raison vient du fait qu'ils se retrouvent dans la cavité  $TM_{010}$  non perturbée. Cette méthode est appelée le mode 0 normal ou le mode 0 où 0 représente la différence de phase cellulaire à un moment donné.

Il existe un résultat intéressant du tube à dérive, c'est que la valeur du champ axial moyen  $E_0$  pour une cellule est liée au flux magnétique par unité de longueur

<sup>6</sup> <http://www.accelerators-for-society.org/about-accelerators/index.php?id=21>

contenue dans la cellule. La loi de Faraday est appliquée en approximant la cavité périodique (voir Figure 7).

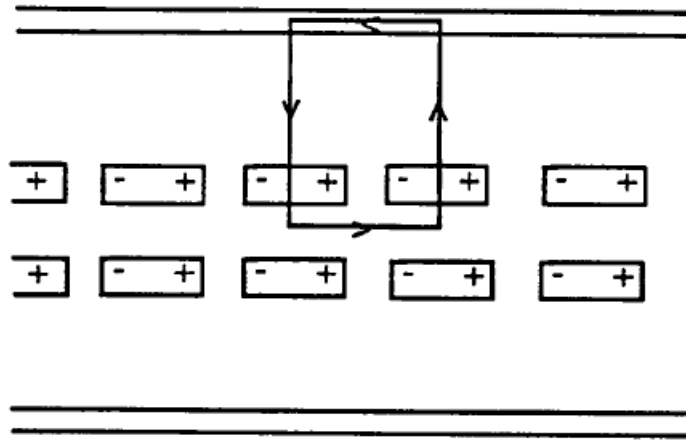


Figure 7: Évaluation de loi de Faraday par intégration du tube à dérive<sup>7</sup>

Pour commencer, on évalue

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int \vec{B} \cdot d\vec{A}.$$

Il y a symétrie à  $E_r=0$  sur le chemin 2 et 4 et aussi pour  $E_z=0$  sur le chemin 3 à l'intérieur du conducteur. Le chemin 1 est le seul qui est non nul et il est donné quand le champ est maximal si

$$-\frac{\partial}{\partial t} \int \vec{E} \cdot d\vec{l} = E_0 \beta \lambda.$$

La partie droite de l'intégrale devient

$$-\frac{\partial}{\partial t} \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = -j\omega\Phi,$$

où  $\Phi$  est le flux magnétique et il est donné par  $\Phi = \int B_\theta dr dz$ . La partie droite et la partie de gauche sont liées par  $E_0 \beta \lambda = \omega\Phi$ .

<sup>7</sup> <http://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-93-0805>

$B\lambda$  est la longueur de la cellule et  $E_0$  est proportionnel au flux magnétique par unité de longueur de la cellule.  $E_0$  peut être identique pour toutes les cellules de la structure lorsque le flux magnétique par unité de longueur est égal pour les cellules. Il est possible d'obtenir le même  $B_0$  près des murs en réglant les cellules. On peut aussi mesurer les champs magnétiques relatifs à l'aide de la technique de perturbation standard à travers des trous dans la paroi extérieure. Le flux magnétique par unité de longueur et  $E_0$  peuvent être identiques pour toutes les cellules si le rayon de la cavité est constant sur la longueur et qu'il est radialement uniforme pour  $B_0$ , et ce, indépendamment de leur longueur. À travers chaque cellule, la tension change avec la longueur de la cellule  $\beta\lambda$  parce que  $V_0 = E_0\beta\lambda$ . On détermine les tensions cellulaires par la fraction de la longueur occupée par chaque cellule.

### Structure des tubes à dérive

Pour continuer, les tubes à dérive sont maintenus mécaniquement par des tiges, parfois au-dessus ou parfois au-dessous, tout dépendamment comment les ingénieurs veulent le construire. Sur les parois extérieures, les courants se déplacent longitudinalement et sur les tubes de dérive, les courants sont toujours en phase. On peut voir les directions des courants à l'aide de la Figure 8.

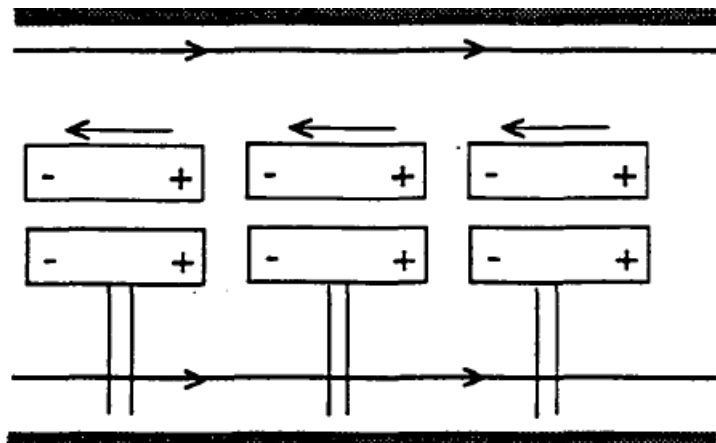


Figure 8: Les charges et les courants dans un tube à dérive<sup>8</sup>

L'espace restant dans les tubes à dérive est utilisé pour installer des aimants quadripôles de focalisation. Les courants produisent une dissipation de puissance, car

<sup>8</sup> <http://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-93-0805>

les champs magnétiques varient dans le temps sur la surface des tiges. On sait que  $E_0$  doit être le même pour toutes les cellules, mais le champ électrique de surface varie selon la longueur d'intervalle. On peut voir les profils radiaux typiques des champs magnétiques et électriques (voir Figure 9) et les lignes du champ électrique (Figure 10).

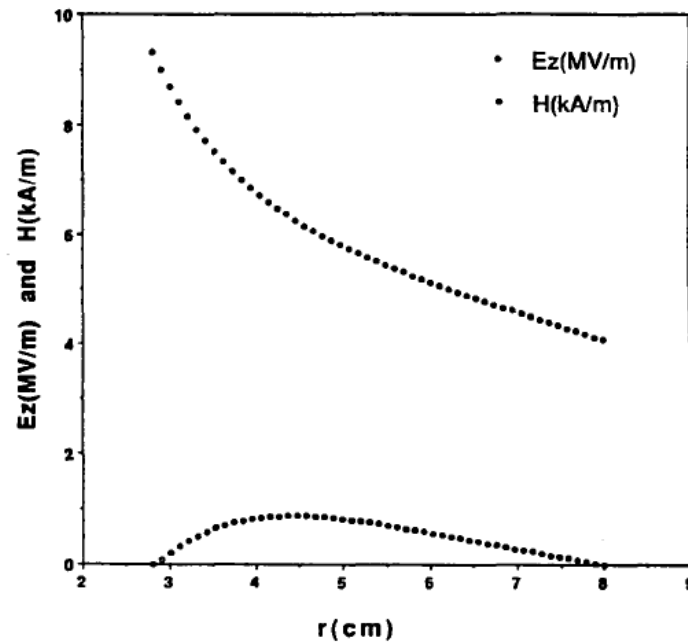


Figure 9: Les champs magnétiques et électriques typiques par rapport au rayon du tube à dérive dans le plan transversal traversant le centre du tube de dérive<sup>9</sup>

Le champ électrique axial moyen dans la cellule est de 2,2 MV / m.

<sup>9</sup> <http://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-93-0805>

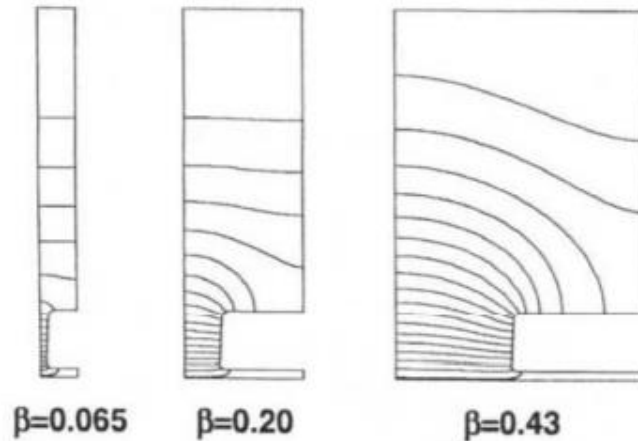


Figure 10: Les lignes du champ électrique montrées dans un quart des projections de trois cellules de dérive<sup>10</sup>

### Ensemble de cellules de cavité

D'une autre part, le tube à dérive est un ensemble de cellules de cavité. Si un plan conducteur a été inséré au centre de chaque tube perpendiculaire à l'axe de la cavité, le champ électrique aura une composante longitudinale (axe z) et ne sera pas perturbé. De plus, les fréquences de résonance ne changeront pas. On ne cherche pas à avoir des parois conductrices aux extrémités de la cellule parce qu'elles dissiperaient la puissance. On peut considérer les cavités comme un circuit constitué par des condensateurs aux tubes à dérive et l'inductance associée à une boucle de courant à la paroi externe du cylindre. Toutefois, on a besoin de code numérique pour avoir une analyse quantitative précise des propriétés de la structure. Le circuit est plus utile pour avoir une compréhension qualitative.

On considère le modèle de champ électrique en fonction de la vitesse des particules  $\beta$ , comme le montre la Figure 9. Lorsque la vitesse des particules  $\beta$  est faible, les lignes de champ se contractent sur la face avant du tube à dérive. Si sa vitesse augmente, la longueur de la cellule augmente. Il faut diminuer la capacité pour avoir des fréquences constantes. Si  $\beta$  est très élevé, les lignes de champ se retrouvent plus sur le diamètre extérieur du tube à dérive.

<sup>10</sup> <http://uspas.fnal.gov/materials/09VU/Lecture4.pdf>

## **4. Conclusion**

Pour finir, il existe plusieurs moyens de créer une structure d'accélération, comme contrôler les cavités par son propre générateur et utiliser la phase pour fournir une accélération continue sur toute la longueur de l'accélérateur. L'autre solution est d'exciter une onde stationnaire dans un réseau de cavités multicellulaire ou couplé en utilisant un seul générateur d'ondes radioélectriques. Maintenant, il utilise le RFQ pour les vitesses. Ensuite, les tubes à dérive sont utilisés par méthode Alvarez, où le champ électrique ne passe pas partout. Il y a une formule importante à cette méthode:  $E_0\beta\lambda = \omega\Phi$ . Aussi, on a pu voir la structure et les directions des courants du tube à dérive. En parallèle, les cavités ont été abordées, car le tube à dérive peut être un ensemble de cavités.

## 5. Références

### **Sites internet:**

[http://www.npc.edu.pk/docs/iss/talks/Plannary\\_Sessions/P\\_D3\\_F\\_Gerigk.pdf](http://www.npc.edu.pk/docs/iss/talks/Plannary_Sessions/P_D3_F_Gerigk.pdf)

<http://uspas.fnal.gov/materials/09VU/Lecture4.pdf>

[http://uspas.fnal.gov/materials/11ODU/Proton\\_3.pdf](http://uspas.fnal.gov/materials/11ODU/Proton_3.pdf)

[http://www.patentsencyclopedia.com/imgfull/20120126727\\_02](http://www.patentsencyclopedia.com/imgfull/20120126727_02)

<http://www.accelerators-for-society.org/about-accelerators/index.php?id=21>

<http://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-93-0805>

<https://cds.cern.ch/record/1542425/files/p253.pdf>

### **Documents:**

Gluckstem, R. L., “Radio-Frequency Systems: Electromagnetic Fields in RF Cavities and Cavity Chains”, Physics of Particle Accelerator, AIP Conference Proceedings 127,344 (1985).

Knapp, E.A., B.C. Knapp, and J.M. Potter, Review of Scientific Instruments 39,979 (1968).

Le Duff, J., “Dynamics and Acceleration in Linear Structures”, CERN Accelerator School, CERN 85-19, 27 (November, 1985)

L. Marleau, Introduction à la physique des particules, Québec: Département de physique, de génie physique et d’optique, Université Laval, 2017.

Schempp, A., “Principles and Technology of RFQs”, Physics of Particle Accelerators, AIP Conference proceedings 184, Vol 2, 1477 (1989).