

---

# Contribution aux exercices de prospective nationale 2020-2030

## *Accélérateurs et instrumentation associée*

---

### ÉTUDE ET DEVELOPPEMENT D'UN ACCELERATEUR PLASMA A LA RESONANCE CYCLOTRONIQUE ELECTRONIQUE (ECHIPAC)

---

#### **Auteur principal**

Nom : Thuillier

Affiliation : LPSC

Email et coordonnées : [thuillier@lpsc.in2p3.fr](mailto:thuillier@lpsc.in2p3.fr), LPSC, 53 avenue des martyrs, 38026 Grenoble cedex

#### **Co-auteurs**

*(liste des noms et affiliations)*

Thomas ANDRE, LPSC

Dominique Bondoux, LPSC

Laurent Maunoury, GANIL

Contribution à rédiger en français ou en anglais et à envoyer à [PROSP2020-GT07-COPIL-L@IN2P3.FR](mailto:PROSP2020-GT07-COPIL-L@IN2P3.FR)  
avant le **1<sup>er</sup> novembre 2019**

## 1. Informations générales

**Titre : ETUDE ET DEVELOPPEMENT D'UN ACCELERATEUR PLASMA A LA RESONANCECYCLOTRONIQUE ELECTRONIQUE**

**Acronyme : ECRIPAC**

**Résumé (max. 600 caractères espaces compris)**

*L'objectif scientifique est d'étudier une nouvelle voie d'accélération des ions jamais testée expérimentalement. Il s'agit de la machine ECRIPAC proposée par R. Geller (1990) qui utilise principalement un plasma ECR pulsé et un gradient de champ magnétique. Le premier jalon consiste à valider par une simulation PIC le phénomène physique permettant l'accélération des ions. Le deuxième jalon consiste à concevoir, fabriquer et tester un démonstrateur permettant d'accélérer des ions jusqu'à  $\sim 10$  MeV/A. Ce projet peut déboucher sur une rupture technologique et a un potentiel d'application sociétal.*

**Préciser le domaine de recherche (plusieurs choix possibles)**

- *Physique des accélérateurs (nouveaux concepts machines, optique et dynamique des faisceaux...)*
- *Sources de particules (électrons, positrons, muons, protons, ions lourds stables, ions radioactifs...) et cibles associées*
- *Supraconductivité accélérateur (aimants fort champ, cavités SRF...)*
- *Accélération plasma (électrons, ions...) et interaction lasers/faisceaux*
- *Diagnostics faisceau, instrumentation et contrôle intelligent*
- *Développement durable de la discipline (infrastructures technologiques, efficacité énergétique, fiabilité...)*

**Préciser la motivation principale visée par la contribution :**

- *Accélérateurs pour la physique nucléaire*
- *Accélérateurs pour les sources de lumière ou de neutrons*
- *Accélérateurs pour les applications sociétales (santé, énergie, industrie...)*

## 2. Description des objectifs scientifiques et techniques (2 pages max incl. figures)

*Décrire les objectifs scientifiques et/ou techniques de la contribution proposée en en précisant les motivations.*

*Le premier objectif scientifique consiste à démontrer la faisabilité de développer une machine ECRIPAC [1] (Electron Cyclotron Resonance Ion Plasma Accelerator, voir la page suivante pour un descriptif détaillé) capable de produire des pulses de faisceaux d'ions à haute énergie ( $E > 10$  MeV/A) sans cavité accélératrice ni faisceau laser intense, à l'aide d'un plasma chauffé à la résonance cyclotronique électronique (ECR). Le deuxième objectif est technique et consiste à concevoir, construire et tester un démonstrateur d'une taille de 5 mètres environ dans un laboratoire français capable d'accélérer des ions jusqu'à  $\sim 10$  MeV/A. Les applications de long terme visées sont identiques à celles des accélérateurs traditionnels : physique nucléaire (génération de neutrons, irradiations), physique médicale (synthèse d'isotopes, traitement du cancer). Ce projet nécessite une collaboration avec la communauté française de physique des plasmas, avec les experts d'aimants pulsés (LNCMI-Toulouse) et/ou d'aimants supraconducteurs (CEA Saclay) et les experts de diagnostics faisceau de l'IN2P3.*

*Préciser comment ces objectifs se situent par rapport à l'état de l'art et au contexte international (ex : est-ce une contribution visant un développement théorique ou expérimental ? Est-elle dans la continuité de concepts ou technologies actuelles, ou bien est-ce une nouvelle approche conceptuelle ? ) Préciser les liens éventuels avec d'autres projets nationaux ou internationaux existants ou envisagés.*

*Aujourd'hui, l'accélération des ions à haute énergie est réalisée soit par un accélérateur de particule classique (cyclotron ou LINAC), soit par l'accélération laser plasma. La première technologie est bien connue et maîtrisée, la deuxième est actuellement un sujet de recherche très actif où des moyens financiers importants sont engagés. Cette prospective propose une nouvelle voie d'accélération des ions qui n'a jamais été testée depuis les publications de Geller [1] (1990) et Bertrand (1992) [2], ni avec des outils de simulation moderne, ni expérimentalement. L'ECRIPAC peut déboucher pour un montant investi relativement modeste ( $< 1$  M€) sur une rupture technologique.*

*Le potentiel d'application sociétale d'une machine ECRIPAC est important car elle est rustique et d'un coût modeste par rapport à celui d'un accélérateur classique. Les composants principaux de la machine se limitent à un long solénoïde (pulsé ou continu), une bobine pulsée et un émetteur microonde.*

*Bien qu'ayant suscité un vif intérêt à l'époque, ce sujet a été oublié par la communauté ECR et aucune équipe dans le monde ne travaille dessus : les retombées scientifiques seront de premier plan à la fois dans la communauté des accélérateurs, la communauté des sources d'ions et la communauté des plasmas. Les technologies mises en œuvre sont bien connues et les équipements nécessaires sont disponibles commercialement ou fabricables dans des laboratoires français sans difficulté particulière.*

### Description de la machine ECRIPAC

Le concept de machine ECRIPAC) a été proposé en 1990 par Geller [1] et vérifié théoriquement par Bertrand [2]. Il utilise trois phénomènes physiques qui ont été démontrés expérimentalement indépendamment l'un de l'autre. Dans un gradient de champ magnétique axial, une bobine pulsée, montée en opposition par rapport au champ magnétique principal, génère un creux dans le profil de champ (voir la figure 1,  $B = B_0$ ) permettant la fabrication d'un plasma ECR par injection d'une onde hyperfréquence. En fin de pulse, l'intensité du champ magnétique  $B_0$  au fond du puits augmente sur quelques dizaines de microsecondes de  $B_0$  à  $B_s$ , de sorte que la condition de résonance ECR en fonction du temps :

$$f_{HF} = \frac{eB(t)}{\gamma(t)m_e}$$

continue à rester conservée pour les électrons relativistes de facteur de Lorentz  $\gamma(t)$ .

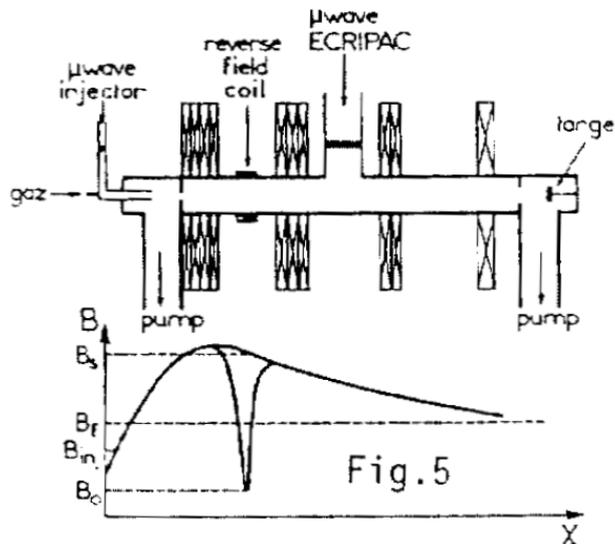


Figure 1 : machine ECRIPAC et profil de champ

Cet effet s'appelle l'effet Gyroc (Gyro-résonant accélération [3,4]). Lorsque le creux de champ est finalement annulé ( $B(t) = B_s$ ), les électrons relativistes dévalent le gradient de champ magnétique et transfèrent leur énergie transverse en énergie longitudinale au champ magnétique grâce à la conservation de leur moment magnétique:

$$\mu = \frac{mv_{\perp}^2}{2B} = \text{const.}$$

Les électrons dévalant le gradient à la position  $x$  ont une vitesse parallèle

$$\frac{v_{\parallel}}{c} = \sqrt{\left(\frac{B_s}{B_0} - 1\right)\left(1 - \frac{B(x)}{B_s}\right)}.$$

L'énergie finale gagnée par les électrons s'écrit:

$$W_{\perp e} = 0.511 \left(\frac{B_s}{B_0} - 1\right) \text{ MeV.}$$

Une partie des ions multichargés du plasma va suivre le paquet d'électrons par ambipolarité (la charge d'espace du nuage d'électrons entraîne les ions du plasma) et être accélérée jusqu'à atteindre des hautes énergies: c'est l'effet PLEIADE, nommé en référence à l'accélérateur plasma du CEA développé par Consoli ayant mis en évidence ce phénomène.[5] Les estimations théoriques dans les publications d'origine prévoient la genèse de faisceaux d'ions avec une énergie finale comprise entre 25 MeV/A et 470 MeV/A selon la quantité d'ions capables de suivre les électrons et la taille de la machine.

## Développements associés, calendrier et budget indicatifs (1 page max. incl. figures)

*Préciser les travaux envisagés pour mener à bien les objectifs décrits (étude conceptuelle, expérience, prototypage, construction...) ainsi que les résultats espérés et leur échéance, en précisant si possible les partenaires potentiels.*

*Si possible, évaluer grossièrement l'ordre de grandeur du financement nécessaire pour mener le développement envisagé (coût complet, en distinguant équipements, consommables et ressources humaines).*

<i>Phase du projet</i>	<i>Description</i>	<i>Durée et coût</i>
<i>Étude théorique</i>	<i>Simulation PIC du concept d'accélération ECRIPAC avec la collaboration d'un laboratoire de physique des plasmas (ex : LPGP). Application de la simulation accélérant des protons avec <math>E &gt; 10 \text{ MeV/A}</math> (tube à vide de diamètre 150 mm, émetteur 2.45 GHz de 30 KW, Gradient de champ de 3 T sur 5 m environ). Encadrement d'un doctorant. Communication des résultats. Le résultat espéré est la validation du concept ECRIPAC.</i>	<i>100 k€ / 3ans 1 doctorant</i>
<i>Étude conceptuelle</i>	<i>Avant-projet sommaire d'un démonstrateur de machine ECRIPAC de 5m et produisant des ions de 10 MeV/A. Embauche d'un post-doc sur 1 ans. Collaboration avec le LNCMI-T et/ou le CEA IRFU pour le gradient de champ magnétique axial (qui peut être pulsé "long" ou continu selon le budget). Collaboration avec le LNCMI-T pour la bobine pulsée. Définition des diagnostics faisceaux du contrôle commande, du vide, etc. Organisation d'une revue nationale ou internationale. Chiffrage de la machine. Avant-projet détaillé sur 1 an. Mise en plan mécanique, demandes de devis. Le résultat de l'étude est un ensemble de documents permettant de construire un démonstrateur ECRIPAC.</i>	<i>100 k€/ 2 ans 1 Post-Doc</i>
<i>Construction et test du démonstrateur ECRIPAC</i>	<i>Suivi de réalisation en sous-traitance, montage du démonstrateur ECRIPAC. Préparation de la salle d'expérience. Tests de fonctionnement. Comparaison simulation/expérience. Publications. Conclusions. Le résultat espéré est la mesure d'ions avec une énergie <math>E &gt; 10 \text{ MeV/A}</math>, la mesure de l'émittance du faisceau et de sa dispersion en énergie.</i>	<i>Démonstrateur &lt;1 M€/ 3-4 ans 1 doctorant (100 k€).</i>



### 3. Impact

**(0.5 page max.)**

*Décrire les retombées espérées pour le développement de futures installations de recherche basées sur des accélérateurs ou pour d'autres applications sociétales.*

*Le cas échéant, préciser les partenariats industriels envisageables.*

Le projet ECRIPAC consiste à étudier un nouveau concept d'accélération d'ions théoriquement capable d'accélérer des pulses d'ions bien au-delà de la barrière coulombienne ( $E > 7$  MeV/A). Compte tenu de la rusticité de la machine, sa simplicité d'emploi, son coût modeste et le fait que ces constituants sont tous parfaitement maîtrisés par le secteur industriel, le bon fonctionnement du démonstrateur ECRIPAC pourrait avoir un impact sociétal important avec des applications commerciales par exemple pour la génération de faisceaux de neutrons, la synthèse de radio-isotopes, etc.

### Références

- [1] R. Geller, G. Melin, K. Golovanivsky, ECRIPAC: A new concept for the production and acceleration to very high-energies of multiply charged ions using an ECR plasma, Second European Particle Accelerator Conference, Mar 1992, Nice, France. pp.449-451, 1990.
- [2] P. Bertrand. "Numerical simulation of ECRIPAC plasma behaviour with Vlasov equations including electron and collective effects." EPAC 92 - Third European Particle Accelerator Conference, Mar 1992, Berlin, Germany. pp.976-978, 1992.
- [3] K.S. Golovanivsky, Phys Scr., 22, 126 (1980).
- [4] K.S. Golovanivsky, IEEE Trans. Plasma Sci., PS 1, 28 (1983).
- [5] T. Consoli and R.B. Hall, Nucl. Fus., 3, 237 (1963).