

ETUDE DE L'APPLICATION DE LA MÉTHODE DU CENTRE GUIDE AUX TRAJECTOIRES DES ELECTRONS DANS LES CHAMPS MAGNÉTIQUES DE SOURCE D'IONS

Antonio MENDEZ-GIONO^{1,2}, Thomas THUILLIER¹, Tiberiu MINEA^{2,3}

¹UGA/CNRS-IN2P3/LPSC - 53, rue des Martyrs - 38026 Grenoble, France

²LPGP - UMR 8578 CNRS - Bat. 210, rue Henri Becquerel - 91405 Orsay, France

³Université Paris-Saclay - 91190 Gif-sur-Yvette, France

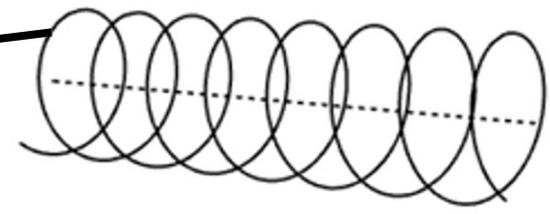
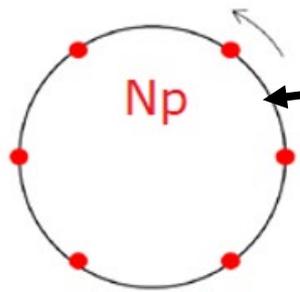


Les Journées Accélérateurs de la Société Française de Physique,
Roscoff, 13-15 octobre 2021

Les Deux Algorithmes

Boris

- La norme pour les simulations de plasma magnétisé.
- Méthode explicite de deuxième ordre. Conservation de l'énergie alors que seul un champ magnétique est présent.
- Pour $B = 1T$, $T_B = 1/\omega_B \sim 35ps$
→ $dt \sim 3ps$.
- La trajectoire est reconstruite de manière classique.

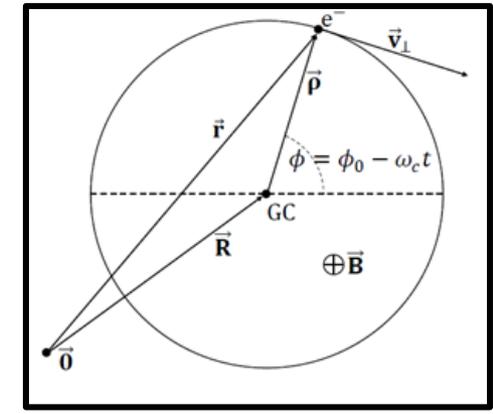


— Orbit GC

Centre Guide

- La dérivé par rapport au temps de la position du centre guide ($d\mathbf{R}/dt$) est définie par la vitesse parallèle au champ magnétique et dérive.
- Le moment dipolaire magnétique (μ) est un invariant adiabatique si le mouvement le long de la chambre à plasma est lent par rapport a la rotation cyclotronique.
- Équivalente, le rayon de Larmor doit être beaucoup plus petit que l'échelle de variation de ∇B .

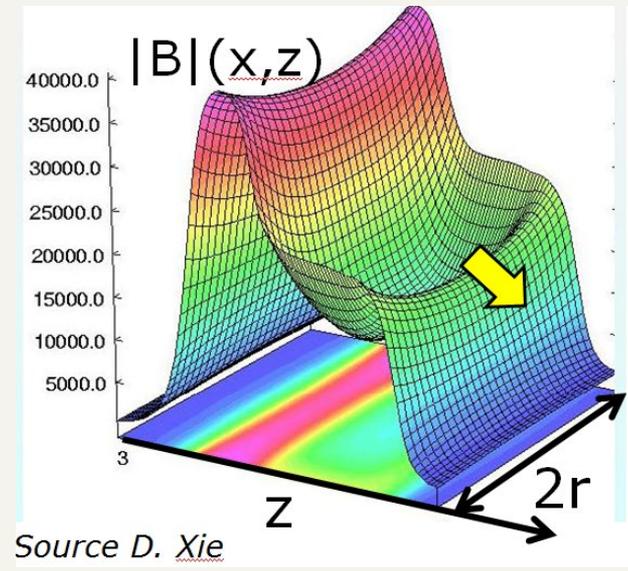
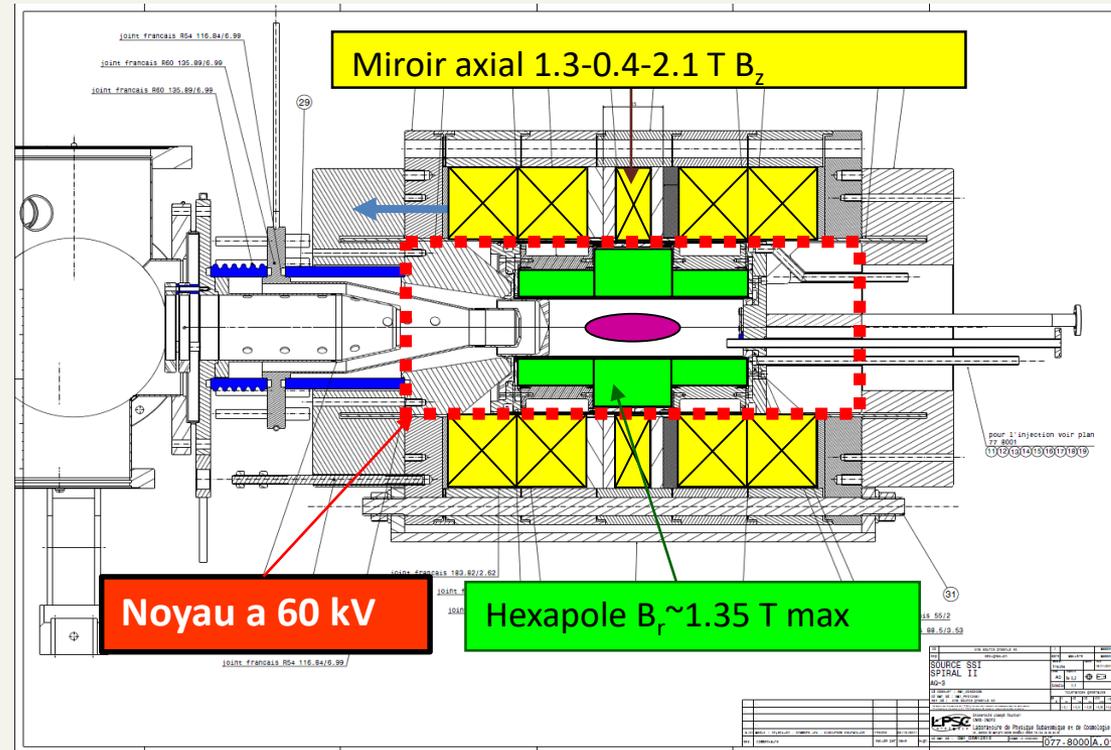
$$\rho_L \ll \frac{B}{|\nabla B|}$$



Phoenix V2 ECRIS

➤ Source d'ions RCE compacte précédemment utilisée sur l'accélérateur SPIRAL 2.

- Fréquence de fonctionnement de 18GHz
- Électrons confinés jusqu'à $\sim 1\text{ms}$
- Fort gradient du champ magnétique ($\sim 40\text{T/m}$)

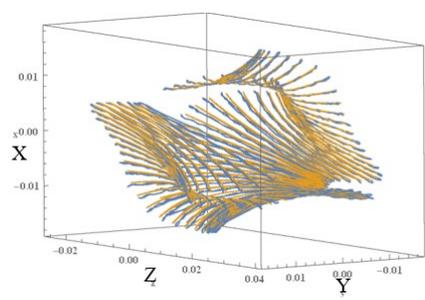


Champ Min-B

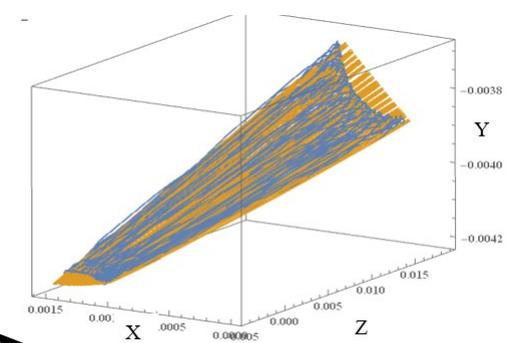
Analyse d'orbite RCE

- Algorithme GC ~ 20 fois plus coûteux par étape de calcul.
- \sim facteur 100 en pas de temps le rend plus rapide.
- Les trajectoires GC sont stables jusqu'à un pas de temps de 100ps, divergent au-delà de 1000ps

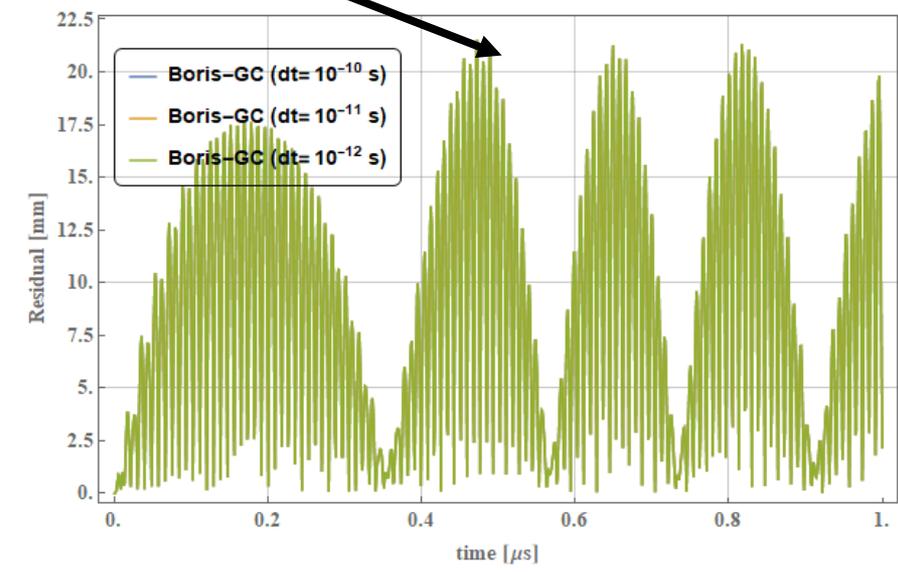
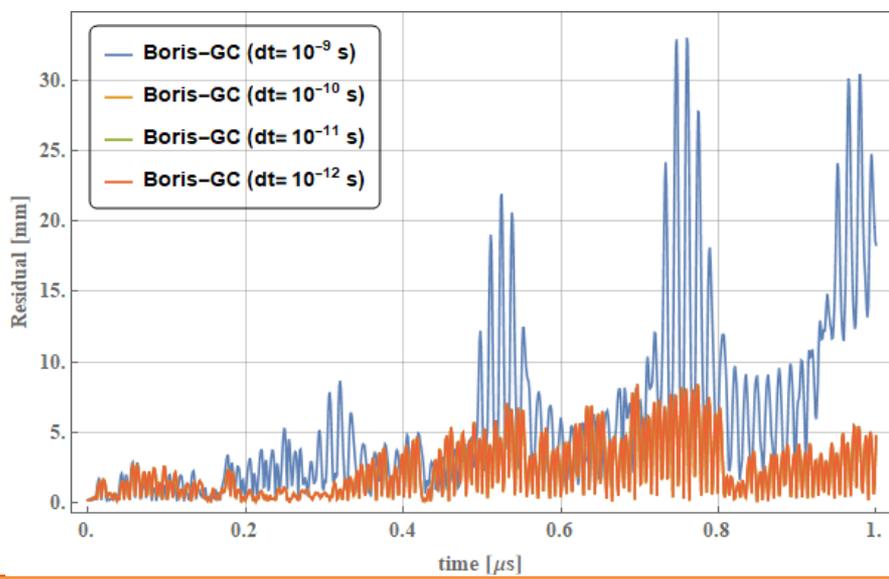
Loin de l'axe



Près de l'axe



Déphasage cyclique



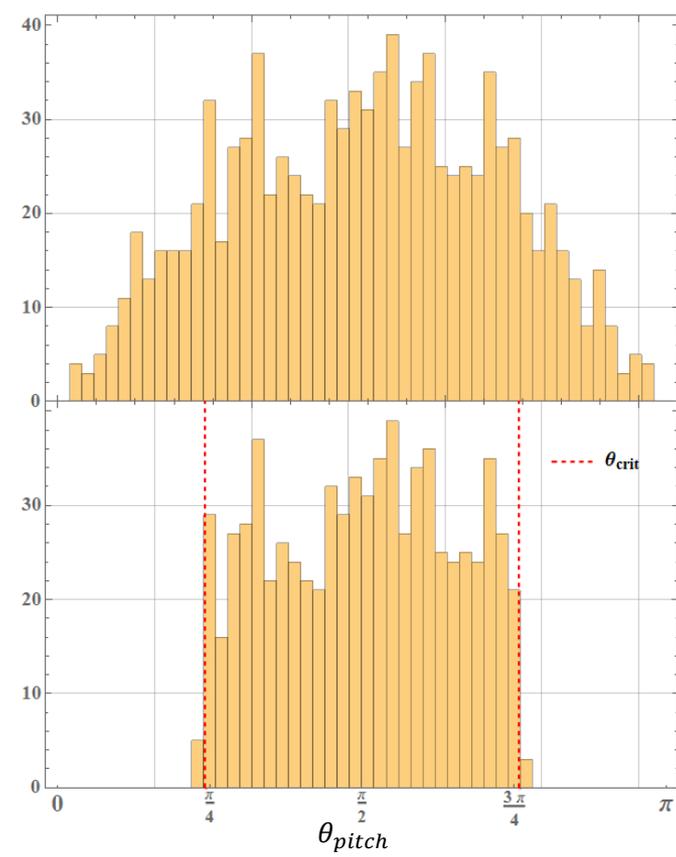
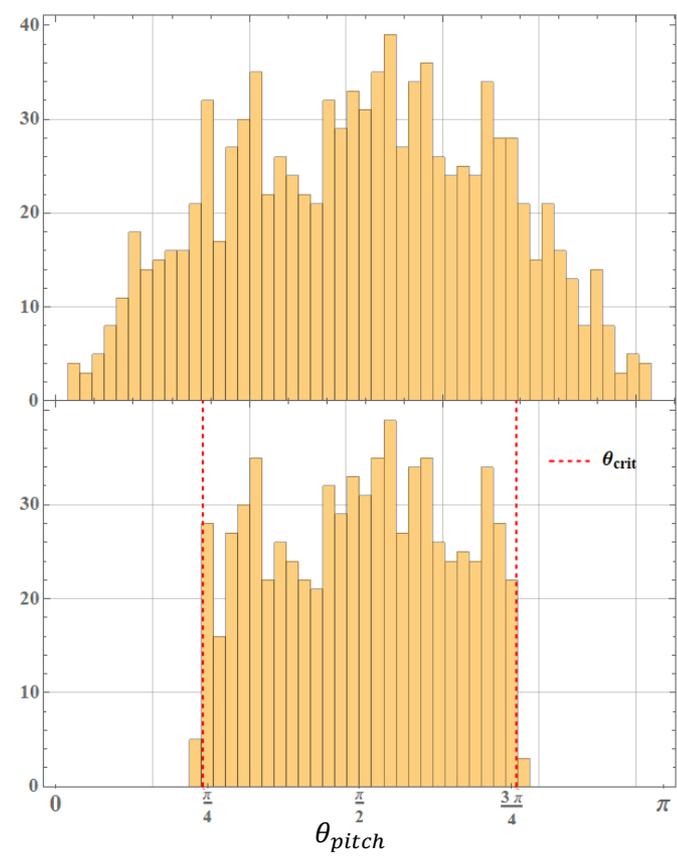


Confinement magnétique

- Bon accord pour la distribution des électrons confinés avec les deux méthodes de propagation
 - Taille d'échantillon 1000 e⁻, plus grand dt valide : 10⁻¹⁰s pour CG and 10⁻¹²s pour Boris

Méthode de Boris e⁻

Méthode du GC e⁻



$$\tan(\theta_{pitch}) = \frac{v_{\perp}}{v_{\parallel}}$$

$$\frac{1}{\mathcal{R}} = \frac{B_0}{B_{max}}$$

$$\sin(\theta_{crit}) = \frac{1}{\sqrt{\mathcal{R}}}$$

SILHI@GANIL ion source

- Fréquence de fonctionnement de 2,45 GHz
- Champ magnétique solénoïdal de $\sim 0.1T$, avec un gradient plus faible par rapport a PHOENIX V2 (0.5 T/m).
- Pas de confinement magnétique, un miroir magnétique vers l'extraction, temps dans la source jusqu'à $\sim 1\mu s$.

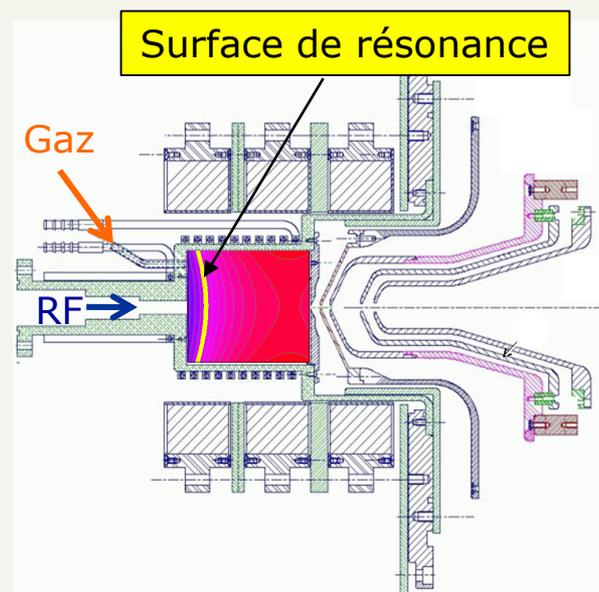
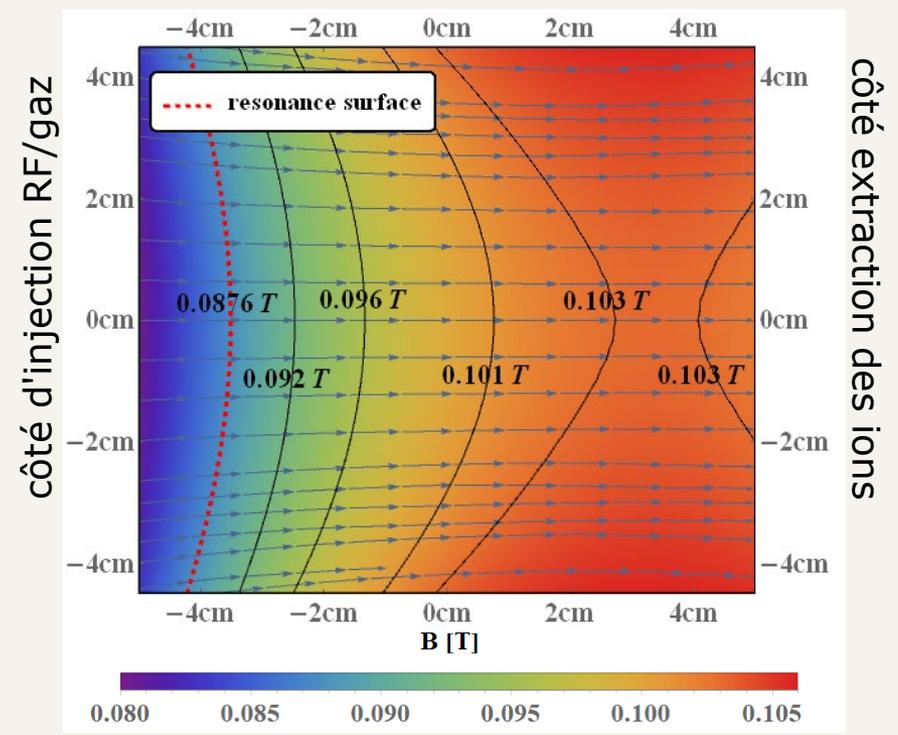


Figure: Source SILHI à aimants permanents (CEA/IRFU/GANIL)



Analyse d'orbite semi-piégée (un rebond) dans SILHI



- Algorithme CG ~ 6 fois plus coûteux en calculs par étape.
- Un pas de temps 10 fois plus grand le rend plus rapide.
- Les trajectoires CG stables jusqu'à un pas de temps de 1000ps, cassées à 10^4 ps.
 - CG peut être jusqu'à environ 10 fois plus rapide par rapport à Boris dans ce régime!

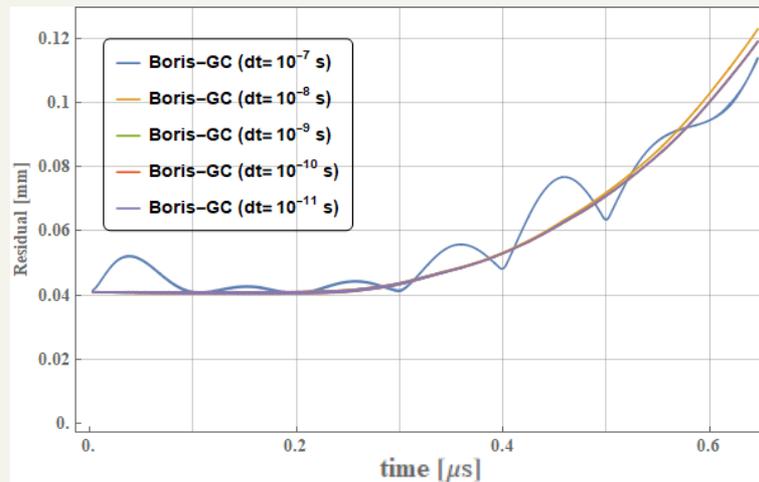
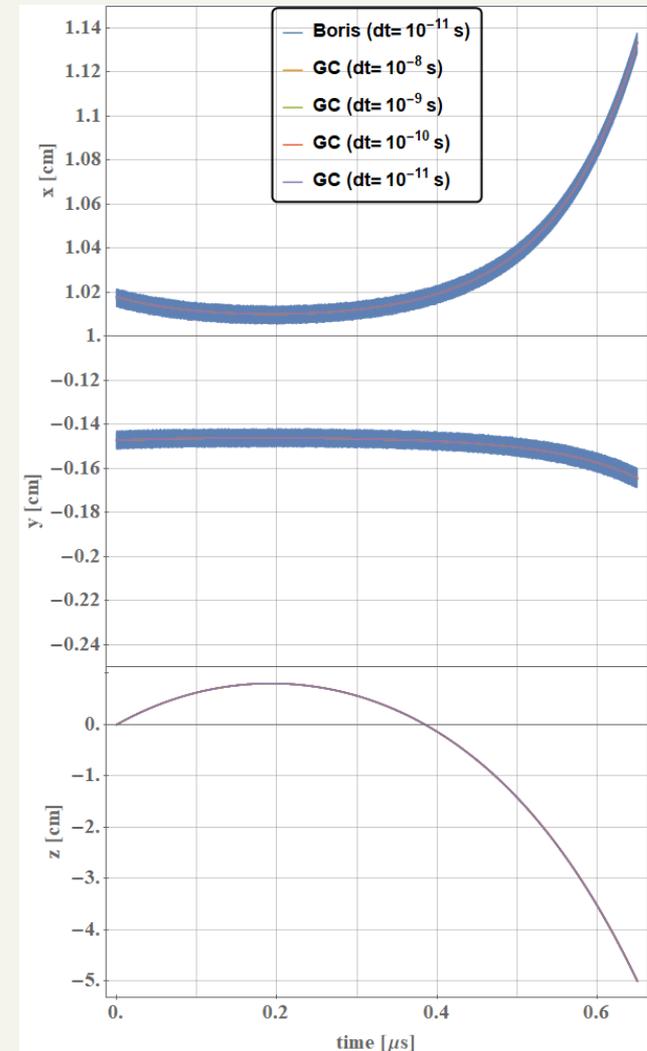


Figure : Résidus de l'orbite Boris-CG aux temps de propagation correspondants.

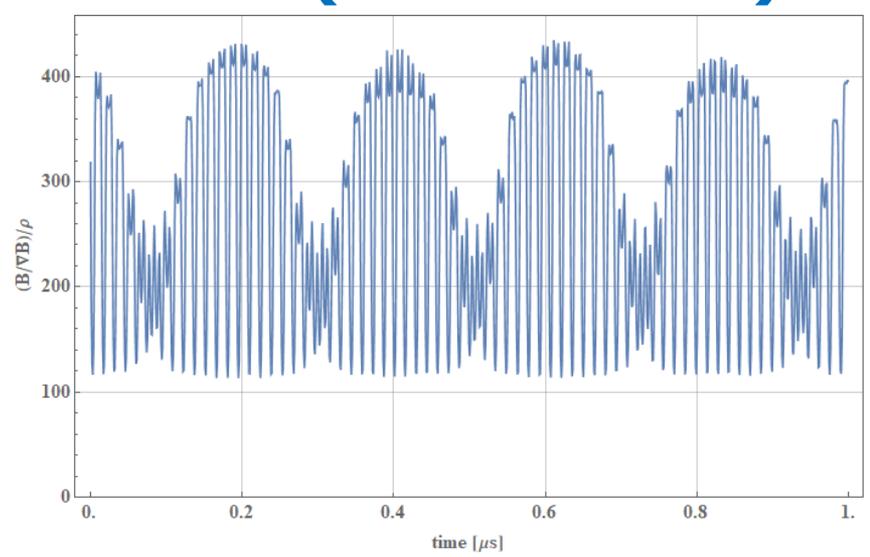


Condition de validité de l'algorithme CG



$$\rho_L \ll \frac{B}{|\nabla B|} \quad \longrightarrow \quad \frac{(B/|\nabla B|)}{\rho_L} \gg 1$$

ECRIS (Phoenix V2)



MDIS (SILHI)

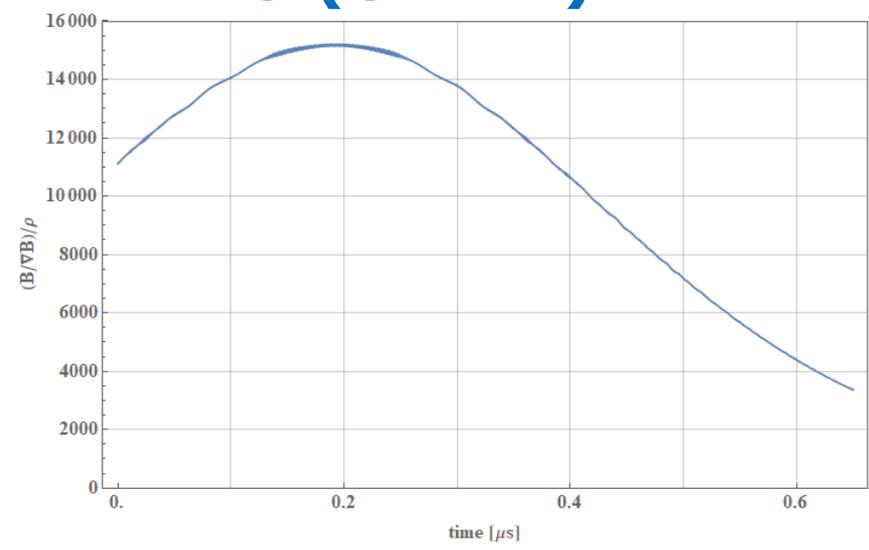


Figure : Condition de validité de l'algorithme GC pour l'orbite type ECRIS et MDIS

L'algorithme GC est plus adapté à une source type SILHI qu'à une type PHOENIX V2

Conclusions et perspectives



- L'algorithme CG peut reproduire avec précision les trajectoires des électrons dans le domaine des deux sources d'ions étudiées
 - PHOENIX V2 ECRIS: $B=1T$, $T_e \sim 1keV$, volume=0.6L
 - SILHI@GANIL: $B=0.1T$, $T_e \sim 1eV$, volume=0.6L
- L'algorithme CG peut apporter un avantage en termes de temps de calcul pour les simulations de plasma de particules.
 - Cet avantage est plus important dans un champ plat, comme observé pour SILHI. Le pas de temps peut être multiplié par 10^3 avec un temps de calcul inférieur de deux ordres de grandeur par rapport à Boris.
 - Pour l'ECRIS PHOENIX V2 les gains sont plus modestes, avec un pas de temps multiplié par un facteur 10^2 et un gain d'un ordre de grandeur en temps de calcul.
- Perspective:
 - Un commutateur « smart » pour l'intégration en orbite pourrait être mis en œuvre, où l'approximation GC est utilisée avec un grand pas de temps lorsqu'elle est valide et une résolution temporelle élevée n'est pas requise.

**JE VOUS REMERCIE POUR VOTRE
ATTENTION!**

Bibliographie

- [1] W. Harman, *Fundamentals of electronic motion*, ser. McGraw-Hill electrical and electronic engineering series. McGraw-Hill, 1953, pp. 109–119. [Online]. Available: <https://books.google.fr/books?id=Ysc8AAAAIAAJ>.
- [2] B. Ripperda, O. Porth, C. Xia, and R. Keppens, “Reconnection and particle acceleration in interacting flux ropes - I. Magnetohydrodynamics and test particles in 2.5D”, *MNRAS*, vol. 467, pp. 3279–3298, May 2017. DOI: 10.1093/mnras/stx379. arXiv: 1611.09966 [astro-ph.HE].
- [3] R. Trassl, “Ecr ion sources”, in. Jan. 2003, vol. 1, pp. 3–37, ISBN: 978-90-481-6402-8. DOI: 10.1007/978-94-017-0542-4_1.
- [4] H. de Blank, “Guiding center motion”, *Fusion Science and Technology*, vol. 45, pp. 47–54, Mar. 2004. DOI: 10.13182/FST04-A468.
- [5] C. Peaucelle, I. Lyon, F. J Angot, P. Grandemange, T. Lamy, and T. Thuillier, “First a/q= 3 beams of phoenix v2 on the heavy ions low energy beam transport line of spiral2”, , Jul. 2010.
- [6] B. Ripperda, F. Bacchini, J. Teunissen, C. Xia, O. Porth, L. Sironi, G. Lapenta, and R. Keppens, “A Comprehensive Comparison of Relativistic Particle Integrators”, *ApJS*, vol. 235, no. 1, 21, p. 21, Mar. 2018. DOI: 10.3847/1538-4365/aab114. arXiv: 1710.09164 [astro-ph.IM].
- [7] P. O. Vandervoort, “The relativistic motion of a charged particle in an inhomogeneous electromagnetic field”, *Annals of Physics*, vol. 10, no. 3, pp. 401–453, 1960, ISSN: 0003-4916. DOI: [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(60\)90004-X](https://doi.org/10.1016/0003-4916(60)90004-X). [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/000349166090004X>.
- [8] T. G. Northrop, “Adiabatic charged-particle motion”, *Reviews of Geophysics*, vol. 1, no. 3, pp. 283–304, 1963. DOI: 10.1029/RG001i003p00283. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/RG001i003p00283>. [Online]. Available: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/RG001i003p00283>.
- [9] J. Rossbach and P. Schmueser, “Basic course on accelerator optics”, *Conf. Proc.*, vol. C9209071, p. 13, 1992.
- [10] H. Qin, S. Zhang, J. Xiao, J. Liu, Y. Sun, and W. M. Tang, “Why is boris algorithm so good?”, *Physics of Plasmas*, vol. 20, no. 8, p. 084503, 2013. DOI: 10.1063/1.4818428. eprint: <https://doi.org/10.1063/1.4818428>. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1063/1.4818428>.
- [11] M. H, I. Saidu, and M. Waziri, “A simplified derivation and analysis of fourth order runge kutta method”, *International Journal of Computer Applications*, vol. 9, Nov. 2010. DOI: 10.5120/1402-1891. <http://dx.doi.org/10.5120/1402-1891>
- [12] D. Eberly, “Derivative approximation by finite differences”, *Geometrictools.com*, Sep. 2010. [Online]. Available: <https://www.geometrictools.com/Documentation/FiniteDifferences.pdf>.