

# Description $N$ -corps de l'interaction onde-particule dans une structure périodique

Damien F. G. Minenna<sup>1,2,3</sup>, Yves Elskens<sup>2</sup>, Frédéric André<sup>3</sup>, Fabrice Doveil<sup>2</sup> & Alexandre Poyé<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centre National d'Études Spatiales, FR-31401 Toulouse cedex 9, France

<sup>2</sup> Aix-Marseille Université, CNRS, PIIM, UMR 7345, FR-13397 Marseille, France

<sup>3</sup> Thales, FR-78140 Vélizy, France

damien.minenna@univ-amu.fr

En électrodynamique classique et en physique microscopique des plasmas, la description  $N$ -corps de l'interaction onde-particule a longtemps été jugée impraticable. Suivant [1,2], nous montrons que cette description est une alternative viable à la traditionnelle approche vlasovienne (cinétique), notamment pour la modélisation temporelle des turbulences et instabilités engendrées par la dynamique non-linéaire des particules (piégeage, chaos, couplages à trois ou quatre ondes).

Le principal problème avec la dynamique  $N$ -corps est le nombre, a priori faramineux, de degrés de liberté, plus important que pour les descriptions cinétiques. Dans les structures périodiques (tubes à ondes progressives, lasers à électrons libres ou accélérateurs de particules), nous contournons cette difficulté grâce à un modèle de réduction [3] des champs en domaine temporel. Cette réduction nous a permis de construire un modèle hamiltonien auto-cohérent  $N$ -corps [4] reposant sur l'échange de quantité de mouvement près de la résonance (lorsque la vitesse de phase de l'onde est proche de la vitesse des particules).

Dans notre exposé, nous présentons notre approche théorique et nos résultats numériques. Notre cas d'étude est la modélisation des tubes à ondes progressives qui, en plus d'être des amplificateurs d'ondes, constituent un outil indispensable pour étudier l'amortissement Landau [5] et plus généralement la turbulence plasma [6,7]. Grâce au modèle hamiltonien, nous avons construit [8] un algorithme symplectique [9] permettant une caractérisation détaillée des instabilités de l'interaction. Les performances de notre algorithme sont comparées avec des approches cinétiques (*particle-in-cell PIC*) et démontrent bien la viabilité de la description  $N$ -corps.

## Références

1. Y. ELSKENS et D. F. ESCANDE, *Microscopic dynamics of plasmas and chaos* (IoP publishing, Bristol, 2003).
2. D. F. ESCANDE, D. BÉNISTI, Y. ELSKENS, D. ZARZOSO et F. DOVEIL, Basic microscopic plasma physics form  $N$ -body mechanics, A tribute to Pierre-Simon de Laplace. *Rev. Mod. Plasma Phys.* **2**, 9 (68 pp) (2018).
3. F. ANDRÉ, P. BERNARDI, N. M. RYSKIN, F. DOVEIL et Y. ELSKENS, Hamiltonian description of self-consistent wave-particle dynamics in a periodic structure. *Europhysics Lett.*, **103**, 28004 (5pp) (2013).
4. D. F. G. MINENNA, Y. ELSKENS, F. ANDRÉ et F. DOVEIL, Electromagnetic power and momentum in  $N$ -body Hamiltonian approach to wave-particle dynamics in a periodic structure. *Europhysics Lett.*, **122**, 44002 (7pp) (2018).
5. F. DOVEIL, D. F. ESCANDE et A. MACOR, Experimental observation of nonlinear synchronization due to a single Wave, *Phys. Rev. Lett.*, **94** 085003 (4pp) (2005).
6. A. MACOR, F. DOVEIL et Y. ELSKENS, Electron climbing a "devil's staircase" in wave-particle interaction, *Phys. Rev. Lett.*, **95** 264102 (4pp) (2005).
7. F. DOVEIL, Y. ELSKENS et D. F. G. MINENNA, Wave-particle interaction studied in a traveling wave Tube, *20<sup>th</sup> International Congress on Plasma Physics ICPP 2018, Vancouver*, conférence invité (2018).
8. D. F. G. MINENNA, *et al.*, DIMOHA : Traveling-wave tube simulations including band edge and multitone operations *20<sup>th</sup> International Vacuum Electronics Conference (IVEC 2019), Busan*, soumis (2019).
9. E. HAIRER, C. LUBICH et G. WANNER, *Geometric numerical integration* (Springer, New York, 2010).