

THÈSE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITÉ DE RENNES 1

ÉCOLE DOCTORALE N° 601
*Mathématiques et Sciences et Technologies
de l'Information et de la Communication*
Spécialité : *Mathématiques et leurs Interactions*

Par

Josselin MASSOT

Modélisation hybride fluide-cinétique de plasmas

Je suis sous le titre

Thèse présentée et soutenue à 127.0.0.1, le un jour
Unité de recherche : IRMAR (UMR CNRS 6625)

Rapporteurs avant soutenance :

Prénom	NOM	Fonction et établissement d'exercice
Prénom	NOM	Fonction et établissement d'exercice
Prénom	NOM	Fonction et établissement d'exercice

Composition du Jury :

Attention, en cas d'absence d'un des membres du Jury le jour de la soutenance, la composition du jury doit être revue pour s'assurer qu'elle est conforme et devra être répercutée sur la couverture de thèse

Président :	Prénom	NOM	Fonction et établissement d'exercice (à préciser après la soutenance)
Examineurs :	Prénom	NOM	Fonction et établissement d'exercice
	Prénom	NOM	Fonction et établissement d'exercice
	Prénom	NOM	Fonction et établissement d'exercice
	Prénom	NOM	Fonction et établissement d'exercice
	Prénom	NOM	Fonction et établissement d'exercice
Dir. de thèse :	Nicolas	CROUSEILLES	Directeur de Recherches, Inria Bretagne Atlantique
Co-dir. de thèse :	Anaïs	CRESTETTO	Maître de Conférences, Université de Nantes

REMERCIEMENTS

Mer sea

TABLE DES MATIÈRES

0	Introduction	7
1	Méthodes exponentielles appliquées aux équations cinétiques	9
2	Modèle hybride linéarisé dans le cas $1dx - 1dv$	11
3	Modèle hybride linéarisé dans le cas $1dz - 3dv$	13
	Conclusion	15
	Première section de la conclusion	15
	Bibliographie	17

INTRODUCTION

Objectif de la thèse

Plasma, contexte physique

Modèles

Méthodes numériques

Rappel des objectifs et plan

Plan :

chap 1 : schémas expo-Lawson pour le cinétique

chap 2-3 : cadre général (6D) modèle hybride

MÉTHODES EXPONENTIELLES POUR RÉSoudre UN PROBLÈME HYPERBOLIQUE AVEC APPLICATION AUX ÉQUATIONS CINÉTIQUES

TODO

Mettre l'article [30] ici, avec peut-être une petite intro et conclusion pour ajouter un peu plus d'info sur l'algorithme d'obtention de CFL etc.

Merci Lukas et Nicolas pour la rédaction de ce chapitre.

MODÈLE HYBRIDE LINÉARISÉ DANS LE

CAS $1dx - 1dv$

TODO

Remettre le chapitre 2 ici

Plop

MODÈLE HYBRIDE LINÉARISÉ DANS LE CAS $1dz - 3dv$

CONCLUSION

Première section de la conclusion

Lorem ipsum dolor sit amet, « consectetur » adipiscing elit. Maecenas fermentum, elit non lobortis cursus, orci velit suscipit est, id mollis turpis mi eget orci. Ut aliquam sollicitudin metus. Mauris at sapien sed sapien congue iaculis. Nulla lorem urna, bibendum id, laoreet iaculis, nonummy eget, massa. Phasellus ullamcorper commodo velit. Class aptent taciti sociosqu ad litora torquent per « conubia nostra », per inceptos hymenaeos. Phasellus est. Maecenas felis augue, gravida quis, porta adipiscing, iaculis vitae, felis. Nullam ipsum. Nulla a sem ac leo fringilla mattis. Phasellus egestas augue in sem. Etiam ac enim non mauris ullamcorper scelerisque. In wisi leo, malesuada vulputate, tempor sit amet, facilisis vel, velit. Mauris massa est, sodales placerat, luctus id, hendrerit a, urna. Nullam eleifend pede eget odio. Duis non erat. Nullam pellentesque.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Roger ALEXANDER, « Diagonally Implicit Runge–Kutta Methods for Stiff O.D.E.'s », in : *Journal on Numerical Analysis* 14.16 (1976), p. 1006-1021, DOI : 10.1137/0714068.
- [2] Asad ALI, « Hybrid algorithm for the Vlasov-Poisson system », Computational Science and Engineering (International Master's Program), Technische Universität München, 2018.
- [3] George A BAKER, *Essentials of Padé approximants*, New York, Academic Press, 1975.
- [4] Stéphane BALAC et Arnaud FERNANDEZ, « Mathematical analysis of adaptive step-size techniques when solving the nonlinear Schrödinger equation for simulating light-wave propagation in optical fibers », in : *Optics Communications* 329 (2014), DOI : 10.1016/j.optcom.2014.04.081.
- [5] Stéphane BALAC et Fabrice MAHÉ, « Embedded Runge-Kutta scheme for step-size control in the interaction picture method », in : *Computer Physics Communications* 184.4 (2013), p. 1211-1219, DOI : 10.1016/j.cpc.2012.12.020.
- [6] Michael BALDAUF, « Stability Analysis for linear discretisations of the advection equation with Runge-Kutta time integration », in : *Journal of Computational Physics* (2008).
- [7] J. W. BANKS et J. A. F. HITTINGER, « A New Class of Non-Linear, Finite-Volume Methods for Vlasov Simulation », in : *IEEE Transactions on Plasma Science* 38.9 (2010), p. 2198-2207, DOI : 10.1109/TPS.2010.2056937.
- [8] Jeffrey W. BANKS et al., « High order accurate conservative finite difference methods for Vlasov equations in 2D+2V », in : *SIAM Journal on Scientific Computing* 41.5 (2019), B953-B982, DOI : 10.1137/19M1238551.

-
- [9] Timothy J. BARTH et Herman DECONINCK, éd., *High-order methods for computational physics*, t. 9, Lecture Notes in Computational Science and Engineering, Springer-Verlag, Berlin, 1999, p. viii+582, ISBN : 3-540-65893-9, DOI : 10.1007/978-3-662-03882-6.
- [10] Hélène BARUCQ, Marc DURUFLÉ et Mamadou N'DIAYE, « High-order Padé and Singly Diagonally Runge-Kutta schemes for linear ODEs, application to wave propagation problems », in : *Numerical Methods for Partial Differential Equations* 34 (2018), p. 760-798, DOI : 10.1002/num.22228.
- [11] R. BELAOUAR et al., « An asymptotically stable semi-Lagrangian scheme in the quasi-neutral limit », in : *Journal of Scientific Computing* (2009), DOI : 10.1007/s10915-009-9302-4.
- [12] Mounir BENNOUNE, Mohammed LEMOU et Luc MIEUSSENS, « Uniformly stable numerical schemes for the Boltzmann equation preserving the compressible Navier-Stokes asymptotics », in : *Journal of Computational Physics* 227.8 (2008), p. 3781-3803, DOI : 10.1016/j.jcp.2007.11.032.
- [13] Christophe BESSE, Guillaume DUJARDIN et Ingrid LACROIX-VIOLET, « High order exponential integrators for nonlinear Schrödinger equations with application to rotating Bose-Einstein condensates », in : *SIAM Journal on Numerical Analysis* 55.3 (2017), p. 1387-1411, DOI : 10.1137/15M1029047.
- [14] Sergio BLANES, Fernando CASAS et Mechthild THALHAMMER, « Splitting and composition methods with embedded error estimators », in : *Applied Numerical Mathematics* 146 (2019), p. 400-415, DOI : 10.1016/j.apnum.2019.07.022.
- [15] Rafael BORGES et al., « An improved weighted essentially non-oscillatory scheme for hyperbolic conservation laws », in : *Journal of Computational Physics* 227.6 (2008), p. 3191-3211, DOI : 10.1016/j.jcp.2007.11.038.
- [16] Alin BOSTAN et al., *Algorithmes Efficaces en Calcul Formel*, Édition web, 2017, ISBN : 979-1069909472.
- [17] Franck BOYER, *Aspects théoriques et numériques de l'équation de transport*, 2014.
- [18] J. C. BUTCHER, *Numerical Methods for Ordinary Differential Equations*, second edition, Wiley, 2008, ISBN : 9780470753767, DOI : 10.1002/9780470753767.

-
- [19] Fernando CASAS et Alejandro ESCORIHUELA-TOMÀS, « Composition Methods for Dynamical Systems Separable into Three Parts », in : *Mathematics* 8.4 (2020), ISSN : 2227-7390, DOI : 10.3390/math8040533.
 - [20] Fernando CASAS et al., « High-order Hamiltonian splitting for Vlasov-Poisson equations », in : *Numerische Mathematik* 135.3 (2017), DOI : 10.1007/s00211-016-0816-z.
 - [21] Frédérique CHARLES, Bruno DESPRÉS et Michel MEHRENBERGER, « Enhanced Convergence Estimates for Semi-Lagrangian Schemes Application to the Vlasov-Poisson Equation », in : *Journal on Numerical Analysis* 51.2 (2012), DOI : 10.1137/110851511.
 - [22] Frédérique CHARLES, Bruno DESPRÉS et Michel MEHRENBERGER, « Enhanced Convergence Estimates for Semi-Lagrangian Schemes Application to the Vlasov-Poisson Equation », in : *SIAM Journal on Numerical Analysis* 51.2 (2013), p. 840-863, DOI : 10.1137/110851511.
 - [23] Liu CHEN et Fulvio ZONCA, « Physics of Alfvén waves and energetic particles in burning plasmas », in : *Rev. Mod. Phys.* 88 (2016), p. 015008, DOI : 10.1103/RevModPhys.88.015008.
 - [24] Anaïs CRESTETTO, « Optimisation de méthodes numériques pour la physique des plasmas. Application aux faisceaux de particules chargées », thèse de doct., IRMA, 2012.
 - [25] Anaïs CRESTETTO, Nicolas CROUSEILLES et Mohammed LEMOU, « Kinetic/Fluid Micro-Macro Numerical Schemes for Vlasov-Poisson-BGK Equation Using Particles », in : *Kinetic and Related Models* 5.4 (2012), p. 787-816, DOI : 10.3934/krm.2012.5.787.
 - [26] Anaïs CRESTETTO, Nicolas CROUSEILLES et Mohammed LEMOU, « A particle micro-macro decomposition based numerical scheme for collisional kinetic equations in the diffusion scaling », in : *Communications in Mathematical Sciences* (2018).
 - [27] Nicolas CROUSEILLES, « Some few examples of exponential integrators and their stability », mail ven. 26 avr. 16 :59, 2019.
 - [28] Nicolas CROUSEILLES, « Poisson bracket for one electron hybrid model », mail lun. 3 fev. 20 :53, 2020.

-
- [29] Nicolas CROUSEILLES, Lukas EINKEMMER et Erwan FAOU, « Hamiltonian splitting for the Vlasov-Maxwell equations », in : *Journal of Computational Physics* 283 (2015), p. 224-240, DOI : 10.1016/j.jcp.2014.11.029.
- [30] Nicolas CROUSEILLES, Lukas EINKEMMER et Josselin MASSOT, « Exponential methods for solving hyperbolic problems with application to kinetic equations », 2019.
- [31] Nicolas CROUSEILLES, Lukas EINKEMMER et Martina PRUGGER, « An exponential integrator for the drift-kinetic model », in : *Computer Physics Communications* 224 (2018), p. 144-153, DOI : 10.1016/j.cpc.2017.11.003.
- [32] Pierre DEGOND, Giacomo DIMARCO et Luc MIEUSSENS, « A multiscale kinetic-fluid solver with dynamic localization of kinetic effects », in : *Journal of Computational Physics* 229 (2010), p. 4907-4933, DOI : 10.1016/j.jcp.2010.03.009.
- [33] Pierre DEGOND, Shi JIN et Luc MIEUSSENS, « A smooth transition model between kinetic and hydrodynamic equations », in : *Journal of Computational Physics* 209.2 (2005), p. 665-694, DOI : 10.1016/j.jcp.2005.03.025.
- [34] Bruno DESPRÉS, « Uniform asymptotic stability of Strang's explicit compact schemes for linear advection », in : *Journal on Numerical Analysis* 47.5 (2009), p. 3956-3976, DOI : 10.1137/080734571.
- [35] Giacomo DIMARCO et Lorenzo PARESCHI, « Exponential Runge-Kutta methods for stiff kinetic equations », in : *Journal on Numerical Analysis* (2011), DOI : 10.1137/100811052.
- [36] Giacomo DIMARCO et Lorenzo PARESCHI, « High order asymptotic-preserving schemes for the Boltzmann equation », in : *Comptes Rendus Mathématique* 350 (2012), DOI : 10.1016/j.crma.2012.05.010.
- [37] Giacomo DIMARCO et Lorenzo PARESCHI, « Asymptotic preserving implicit-explicit Runge-Kutta methods for non linear kinetic equations », in : *Journal on Numerical Analysis* (2013), DOI : 10.1137/12087606X.
- [38] J.R. DORMAND et P.J. PRINCE, « New Runge-Kutta algorithms for numerical simulation in dynamical astronomy », in : *Celestial mechanics* 18 (1978), p. 223-232, DOI : 10.1007/BF01230162.
- [39] J.R. DORMAND et P.J. PRINCE, « A family of embedded Runge-Kutta formulae », in : *Journal of Computational and Applied Mathematics* 6.1 (1980), p. 19-26, DOI : 10.1016/0771-050X(80)90013-3.

-
- [40] David EBERLY, *Stability Analysis for Systems of Differential Equations*, 2003.
- [41] Francis FILBET et Thomas REY, « A rescaling velocity method for dissipative kinetic equations. Applications to granular media », in : *Journal of Computational Physics* 248 (2013), p. 177-199, DOI : 10.1016/j.jcp.2013.04.023.
- [42] Francis FILBET et Thomas REY, « A hierarchy of hybrid numerical methods for multi-scale kinetic equations », in : *Journal of Scientific Computing* (2014), DOI : 10.1137/140958773.
- [43] Francis FILBET et Tao XIONG, « A hybrid discontinuous Galerkin scheme for multi-scale kinetic equations », in : *Journal of Computational Physics* 372.1 (2018), p. 841-863, DOI : 10.1016/j.jcp.2018.06.064.
- [44] Burton D. FRIED et Samuel D. CONTE, *The Plasma Dispersion Function; the Hilbert transform of the Gaussian*, Academic Press, 1961.
- [45] David GOLDBERG, « What Every Computer Scientist Should Know About Floating-Point Arithmetic », in : *ACM Computing Surveys* 23.1 (1991), p. 5-48, DOI : 10.1145/103162.103163.
- [46] Sigal GOTTLIEB, David KETCHESON et Chi-Wang SHU, *Strong stability preserving Runge-Kutta and multistep time discretizations*, World Scientific, 2011, DOI : 10.1142/7498.
- [47] Sigal GOTTLIEB, Julia S. MULLEN et Steven J. RUUTH, « A Fifth Order Flux Implicit WENO Method », in : *Journal of Scientific Computing* 27 (2006), DOI : 10.1007/s10915-005-9034-z.
- [48] E HAIRER, *Geometric numerical integration : structure-preserving algorithms for ordinary differential equations*, Berlin New York : Springer, 2006, ISBN : 978-3-540-30663-4.
- [49] Ernst HAIRER et Gerhard WANNER, *Solving Ordinary Differential Equations II : Stiff and Differential-Algebraic Problems (Springer Series in Computational Mathematics)*, Springer, 1996.
- [50] Ernst HAIRER, Gerhard WANNER et Syvert P. NØRSETT, *Solving Ordinary Differential Equations I : Nonstiff Problems*, 2^e éd., Springer Series in Computational Mathematics 8, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1993.

-
- [51] Andrew K. HENRICK, Tariq D. ASLAM et Joseph M. POWERS, « Mapped weighted essentially non-oscillatory schemes : Achieving optimal order near critical points », in : *Journal of Computational Physics* 207.2 (2005), p. 542-567, DOI : 10.1016/j.jcp.2005.01.023.
- [52] Nicholas J. HIGHAM, *Functions of Matrices : Theory and Computation*, Society for Industrial et Applied Mathematics, 2008, ISBN : 978-0-898716-46-7.
- [53] Marlis HOCHBRUCK et Alexander OSTERMANN, « Explicit Exponential Runge–Kutta Methods for Semilinear Parabolic Problems », in : *SIAM Journal on Numerical Analysis* 43.3 (2005), p. 1069-1090, DOI : 10.1137/040611434.
- [54] Marlis HOCHBRUCK et Alexander OSTERMANN, « Exponential integrators », in : *Acta Numerica* 19 (2010), p. 209-286, DOI : 10.1017/S0962492910000048.
- [55] Florian HOLDERIED, *Electron Hybrid model for R/L-waves in cold plasmas*, IPP, 2018.
- [56] Florian HOLDERIED, « Investigation of Finite Element Methods for a 4D Hybrid Plasma Model », mém. de mast., Technische Universität München, 2019.
- [57] Florian HOLDERIED et al., « Structure-preserving vs. standard particle-in-cell methods : The case of an electron hybrid model », in : *Journal of Computational Physics* 402 (2020), DOI : 10.1016/j.jcp.2019.109108.
- [58] Eugene ISAACSON et Herbert Bishop KELLER, *Analysis of Numerical Methods*, Dover Publications, 1994.
- [59] A. ISERLES et S. P. NØRSETT, *Order Stars*, Springer, 1991.
- [60] Leah ISHERWOOD, Zachary J. GRANT et Sigal GOTTLIEB, « Strong Stability Preserving Integrating Factor Runge-Kutta Methods », in : *Journal on Numerical Analysis* 56.6 (2018), p. 3276-3307, DOI : 10.1137/17M1143290.
- [61] Guang-Shan JIANG et Chi-Wang SHU, « Efficient Implementation of Weighted ENO Schemes », in : *Journal of Computational Physics* 126 (1996), p. 202-228, DOI : 10.1006/jcph.1996.0130.
- [62] Sébastien JUND, « Méthodes d’éléments finis d’ordre élevé pour la simulation numérique de la propagation d’ondes », thèse de doct., IRMA, 2007.

-
- [63] Yuto KATOH et Yoshiharu OMURA, « Computer simulation of chorus wave generation in the Earth's inner magnetosphere », in : *Geophysical Research Letters* 34.3 (2007), DOI : 10.1029/2006GL028594.
- [64] David KETCHESON, *NodePy (Numerical ODEs in Python) software version 0.6*, 2015.
- [65] David KETCHESON, Colin B. MACDONALD et Steven J. RUUTH, « Spatially partitioned embedded Runge-Kutta methods », in : *SIAM Journal on Numerical Analysis* (2013), DOI : 10.1137/130906258.
- [66] Michael KRAUS et al., « GEMPIC : geometric electromagnetic particle-in-cell methods », in : *Journal of Plasma Physics* 83.4 (2017), p. 905830401, DOI : 10.1017/S002237781700040X.
- [67] Mateusz KZASNICKI, « Ten equivalent definitions of the fractional Laplace operator », in : *Fractional Calculus and Applied Analysis* 20.1 (2017), DOI : 10.1515/fca-2017-0002.
- [68] J. Douglas LAWSON, « An Order Six Runge-Kutta Process with Extended Region of Stability », in : *Journal on Numerical Analysis* (1967), DOI : 10.1137/0704056.
- [69] J. Douglas LAWSON, « Generalized Runge-Kutta Processes for Stable Systems with Large Lipschitz Constants », in : *SIAM Journal on Numerical Analysis* 4.3 (1967), p. 372-380, DOI : 10.1137/0704033, eprint : <https://doi.org/10.1137/0704033>.
- [70] Randall J. LEVEQUE, *Finite-Volume Methods for Hyperbolic Problems*, Cambridge University Press, 2004, ISBN : 9780521009249.
- [71] Randall J. LEVEQUE, *Finite Difference Methods for Ordinary and Partial Differential Equations*, SIAM, 2007, ISBN : 9780898716290.
- [72] Gang LI et Yulong XING, « High order finite volume WENO schemes for Euler equations under gravitational fields », in : *Journal of Computational Physics* 316 (2016), p. 145-163, DOI : 10.1016/j.jcp.2016.04.015.
- [73] Yingzhe LI, Nicolas CROUSEILLES et Yajuan SUN, « Numerical simulations of Vlasov-Maxwell equations for laser plasmas based on Poisson structure », in : *Journal of Computational Physics* 405 (2020), DOI : 10.1016/j.jcp.2019.109172.
- [74] Yingzhe LI et al., « Solving the Vlasov–Maxwell equations using Hamiltonian splitting », in : *Journal of Computational Physics* 396 (2019).

-
- [75] Xu-Dong LIU, Stanley OSHER et Tony CHAN, « Weighted Essentially Non-oscillatory Schemes », in : *Journal of Computational Physics* 115.1 (1994), p. 200-212, ISSN : 0021-9991, DOI : <https://doi.org/10.1006/jcph.1994.1187>.
- [76] Thibaut LUNET et al., « Combination of WENO and Explicit Runge-Kutta Methods for Wind Transport in the Meso-NH Model », in : *Monthly Weather Review* 145.9 (2017), p. 3817-3838, DOI : 10.1175/MWR-D-16-0343.1.
- [77] H. A. LUTHER, « An Explicit Sixth-Order Runge-Kutta Formula », in : *Mathematics of Computation* 22.102 (1968), DOI : 10.2307/2004675.
- [78] Peter MCCORQUODALE et Phillip COLELLA, « A high-order finite-volume method for hyperbolic conservation laws on locally-refined grids », in : *Communications in Applied Mathematics and Computational Science* 6.1 (2011), DOI : 10.2140/camcos.2011.6.1.
- [79] Aaron MEURER et al., « SymPy : symbolic computing in Python », in : *PeerJ Computer Science* 3 (2017), e103, ISSN : 2376-5992, DOI : 10.7717/peerj-cs.103.
- [80] Philip J. MORRISON, « A general theory for gauge-free lifting », in : *Physics of Plasmas* 20 (2012), DOI : 10.1063/1.4774063.
- [81] Philip J. MORRISON, « Structure and structure-preserving algorithms for plasma physics », in : *Physics of Plasmas* 24.5 (2017), p. 055502, DOI : 10.1063/1.4982054.
- [82] Mohammed MOTAMED, Colin B. MACDONALD et Steven J. RUUTH, « On the Linear Stability of the Fifth-Order WENO Discretization », in : *Journal of Scientific Computing* 47 (2010), p. 127-149, DOI : 10.1007/s10915-010-9423-9.
- [83] Jing-Mei QIU et Andrew CHRISTLIEB, « A conservative high order semi-Lagrangian WENO method for the Vlasov equation », in : *Journal of Computational Physics* 229.4 (2010), p. 1130-1149, DOI : 10.1016/j.jcp.2009.10.016.
- [84] Jing-Mei QIU et Chi-Wang SHU, « Conservative high order semi-Lagrangian finite difference WENO methods for advection in incompressible flow », in : *Journal of Computational Physics* 230.4 (2011), p. 863-889, DOI : 10.1016/j.jcp.2010.04.037.
- [85] Jing-Mei QIU et al., « A WENO algorithm for the growth of ionized regions at the reionization epoch », in : *New Astronomy* 13.1 (2008), p. 1-11, DOI : 10.1016/j.newast.2007.06.002.

-
- [86] Chi-Wang SHU, *Essentially Non-Oscillatory and Weighted Essentially Non-Oscillatory Schemes for Hyperbolic Conservation Laws*, rapp. tech., Brown University, 1997, DOI : 10.1007/BFb0096355.
 - [87] Chi-Wang SHU, « High Order ENO and WENO Schemes for Computational Fluid Dynamics », in : *High-Order Methods for Computational Physics*, sous la dir. de Timothy J. BARTH et Herman DECONINCK, Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1999, p. 439-582, ISBN : 978-3-662-03882-6, DOI : 10.1007/978-3-662-03882-6_5.
 - [88] Chi-Wang SHU, *A Survey of Strong Stability Preserving High Order Time Discretizations*, 2001.
 - [89] Chi-Wang SHU, « High Order Finite Difference and Finite Volume WENO Schemes and Discontinuous Galerkin Methods for CFD », in : *International Journal of Computational Fluid Dynamics* 17.2 (2003), p. 107-118, DOI : 10.1080/1061856031000104851.
 - [90] Eric SONNENDRÜCKER, *Numerical Methods for the Vlasov-Maxwell equations*, Springer, 2015.
 - [91] Raymond J. SPITERI et Steven J. RUUTH, « A New Class of Optimal High-Order Strong-Stability-Preserving Time Discretization Methods », in : *Journal on Numerical Analysis* 40.2 (2002), p. 469-491, DOI : 10.1137/S0036142901389025.
 - [92] Gilbert STRANG, « On the Construction and Comparison of Difference Schemes », in : *SIAM Journal on Numerical Analysis* 5.3 (1968), p. 506-517, DOI : 10.1137/0705041.
 - [93] Masuo SUZUKI, « Fractal decomposition of exponential operators with applications to many-body theories and Monte Carlo simulations », in : *Physics Letters A* 146.6 (1990), p. 319-323, ISSN : 0375-9601, DOI : [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(90\)90962-N](https://doi.org/10.1016/0375-9601(90)90962-N).
 - [94] X. TAO, « A numerical study of chorus generation and the related variation of wave intensity using the DAWN code », in : *Journal of Geophysical Research : Space Physics* (2014), DOI : 10.1002/2014JA019820.
 - [95] Cesare TRONCI, « Hamiltonian approach to hybrid plasma models », in : *Journal of Physics A : Mathematical and Theoretical* 43.37 (2010), p. 375501, DOI : 10.1088/1751-8113/43/37/375501.

-
- [96] Cesare TRONCI et al., « Hybrid Vlasov-MHD models : Hamiltonian vs. non-Hamiltonian », in : *Plasma Physics and Controlled Fusion* 56.9 (2014), p. 095008, DOI : 10.1088/0741-3335/56/9/095008.
- [97] Cédric VILLANI, *A review of mathematical topics in collisional kinetic theory*, North-Holland, 2001.
- [98] Rong WANG et Raymond J. SPITERI, « Linear instability of the fifth-order WENO method », in : *Journal on Numerical Analysis* 45.5 (2007), p. 1871-1901, DOI : 10.1137/050637868.
- [99] Conghai WU et al., « Very high order WENO schemes using efficient smoothness indicators », in : *Journal of Computational Physics* (2021), DOI : 10.1016/j.jcp.2021.110158.
- [100] Weiming WU, Alejandro SÁNCHEZ et Mingliang ZHANG, « An Implicit 2-D Shallow Water Flow Model on Unstructured Quadtree Rectangular Mesh », in : *Journal of Coastal Research* (2011), DOI : 10.2112/SI59-003.1.
- [101] Fuliang XIAO, Richard M. THORNE et Danny SUMMERS, « Instability of electromagnetic R-mode waves in a relativistic plasma », in : *Physics of Plasmas* (1998), DOI : 10.1063/1.872932.
- [102] Chang YANG et Francis FILBET, « Conservative and non-conservative methods based on Hermite weighted essentially-non-oscillatory reconstruction for Vlasov equations », in : *Journal of Computational Physics* 279 (2014), p. 18-36.
- [103] Haruo YOSHIDA, « Construction of higher order symplectic integrators », in : *Physics Letters A* 150.5 (1990), DOI : 10.1016/0375-9601(90)90092-3.

Titre : Modélisation hybride fluide-cinétique de plasmas

Mot clés : de 3 à 6 mots clefs

Résumé : Eius populus ab incunabulis primis ad usque pueritiae tempus extremum, quod annis circumcluditur fere trecentis, circummura pertulit bella, deinde aetatem ingressus adultam post multiplices bellorum aerumnas Alpes transcendit et fretum, in iuvenem erectus et virum ex omni plaga quam orbis ambit inensus, reportavit laureas et triumphos, iamque vergens in senium et nomine solo aliquotiens vincens ad tranquilliora vitae discessit. Hoc immaturo interitu ipse quoque sui pertaesus excessit e vita aetatis nono anno atque vicensimo cum quadriennio imperasset. natus apud Tuscos in Massa Vaternensi, patre Constantio Constantini fratre imperatoris, matreque Galla. Thalassius vero

ea tempestate praefectus praetorio praesens ipse quoque adrogantis ingenii, considerans incitationem eius ad multorum augeri discrimina, non maturitate vel consiliis mitigabat, ut aliquotiens celsae potestates iras principum molliverunt, sed adversando iurgandoque cum parum congrueret, eum ad rabiem potius evibrabat, Augustum actus eius exaggerando creberrime docens, idque, incertum qua mente, ne lateret adfectans. quibus mox Caesar acrius efferatus, velut contumaciae quoddam vexillum altius erigens, sine respectu salutis alienae vel suae ad vertenda opposita instar rapidi fluminis irrevocabili impetu ferebatur. Hae duae provinciae bello quondam piratico catervis mixtae praedonum.

Title: Fluid-kinetic hybrid model of plasmas

Keywords: de 3 à 6 mots clefs

Abstract: Eius populus ab incunabulis primis ad usque pueritiae tempus extremum, quod annis circumcluditur fere trecentis, circummura pertulit bella, deinde aetatem ingressus adultam post multiplices bellorum aerumnas Alpes transcendit et fretum, in iuvenem erectus et virum ex omni plaga quam orbis ambit inensus, reportavit laureas et triumphos, iamque vergens in senium et nomine solo aliquotiens vincens ad tranquilliora vitae discessit. Hoc immaturo interitu ipse quoque sui pertaesus excessit e vita aetatis nono anno atque vicensimo cum quadriennio imperasset. natus apud Tuscos in Massa Vaternensi, patre Constantio Constantini fratre imperatoris, matreque Galla. Thalassius vero

ea tempestate praefectus praetorio praesens ipse quoque adrogantis ingenii, considerans incitationem eius ad multorum augeri discrimina, non maturitate vel consiliis mitigabat, ut aliquotiens celsae potestates iras principum molliverunt, sed adversando iurgandoque cum parum congrueret, eum ad rabiem potius evibrabat, Augustum actus eius exaggerando creberrime docens, idque, incertum qua mente, ne lateret adfectans. quibus mox Caesar acrius efferatus, velut contumaciae quoddam vexillum altius erigens, sine respectu salutis alienae vel suae ad vertenda opposita instar rapidi fluminis irrevocabili impetu ferebatur. Hae duae provinciae bello quondam piratico catervis mixtae praedonum.