

Force de Pression cinétique dans la reconnexion magnétique non collisionnelle

Nicolas Aunai, Gérard Belmont, Matteo Faganello, Roch Smets
Laboratoire de physique des plasmas, Ecole polytechnique route de Saclay 91128 Palaiseau cedex

Mots clés : Reconnexion magnétique, accélération, simulation

Résumé

L'accélération des ions est étudiée dans le cadre de la reconnexion magnétique non collisionnelle. Des simulations hybrides 2D nous ont permis de comprendre que les protons sont accélérés par un puits de potentiel divergent formé par l'effet Hall des électrons pré-accelérés au point X. Ces oscillations permettent de convertir l'énergie potentielle en énergie cinétique dirigée et thermique. Nous comparons les résultats Hybrides avec une simulation 2D bi-fluide et nous montrons que l'accélération cinétique des protons engendre du point de vue fluide une force de pression non diagonale non négligeable ne pouvant apparaître dans le code fluide. Un parallèle avec les observations à la queue de la magnétosphère sera fait.

Introduction

La reconnexion magnétique est un phénomène plasma très intéressant pour sa capacité à convertir de l'énergie magnétique sous forme d'énergie cinétique dirigée et thermique. La reconnexion joue donc un rôle important dans les milieux magnétisés présentant des problématiques d'accélération et/ou de dissipation comme le Soleil, les magnétosphères planétaires, les tokamaks, etc. La valeur du taux de reconnexion constitue une contrainte observationnelle très forte pour les modèles. Depuis quelques années, les simulations numériques montrent que dans le cas non collisionnel le taux de reconnexion est bien plus élevé que celui proposé par le modèle de Sweet et Parker. C'est le découplage successif des ions et des électrons du champ magnétique qui serait responsable de cette dynamique plus efficace. Il semble couramment accepté (peut-être à tort ?) que les électrons ne jouent de rôle important que dans leur capacité à autoriser la reconnexion via leur découplage du champ magnétique, et que leur dynamique s'adapterait à celle des plus grandes échelles. A la démagnétisation des électrons s'associe une grande accélération par le champ électrique de reconnexion et un rapide flot électronique le long des séparatrices. Cette structure va être déterminante dans la manière dont les ions vont se coupler à nouveau au champ magnétique et ainsi limiter le taux de reconnexion. Il est ainsi capital de comprendre les mécanismes permettant d'accélérer le fluide ionique. Certains auteurs, via des simulations Hybrides ([1], [2], [3], [4], [5], [6]), *particle in cell* (PIC) ([7]), montrent des signatures cinétiques dans les fonctions de distributions des ions à proximité du site de reconnexion et les interprètent comme la conséquence d'orbites de type Speiser ([8]) établies auparavant par les simulations particules test. Cependant les simulations particule test n'incluent en général pas la structure complexe des champs Hall, en particulier du champ électrique. [9] invoquent le champ Hall dirigé vers l'aval comme responsable de l'accélération fluide des ions jusqu'à une vitesse d'Alfvén. Enfin il est couramment observé ([10]) que la vitesse fluide aval du plasma est bien inférieure dans les modèles cinétiques que dans les modèles fluides.

A l'aide de simulations Hybrides 2D, nous allons montrer que l'accélération de ions est fortement liée à la structure du potentiel électrostatique créée dans la reconnexion Hall. Nous montrerons que le mécanisme d'accélération cinétique structure la fonction de distribution de telle sorte que du point de vue fluide une force de pression constituée des éléments non diagonaux s'oppose au champ électrique dirigé vers l'aval. A la suite de cette remarque, nous comparerons le bilan des forces fluides s'exerçant sur les ions dans la zone Hall dans une simulation Hybride et dans une simulation Bi-fluide. Nous ferons le lien avec des observations de reconnexion dans la queue magnétosphérique où les fonctions de distributions peuvent donner lieu à des interprétations similaires, et comment ce mécanisme pourrait éventuellement constituer une observable de plus dans l'identification de la zone Hall dans les données.

1. Accélération fluide

La figure 1 montre un zoom sur la région Hall créée par la reconnexion magnétique non collisionnelle, c'est à dire le champ électrique là où le terme $J \times B$ est supérieur ou égal au terme de convection $V \times B$. On peut voir que cette région est microscopique en comparaison à la taille de la boîte de simulation et prend une forme rectangulaire d'environ 1×10^3 c/wpi de côté. c'est dans cette région que l'inertie des ions est importante. En dehors le fluide (ions + électrons) gelé dans le champ magnétique, son mouvement est donnée par la dérive $E \times B$ des lignes de champ. La figure 2 montre la vitesse fluide des ions dans la direction aval sur une coupe passant par le point X. On note la courte distance sur laquelle les ions sont accélérés avant que la vitesse n'atteigne un plateau dont la valeur est inférieure aux prédictions courantes.

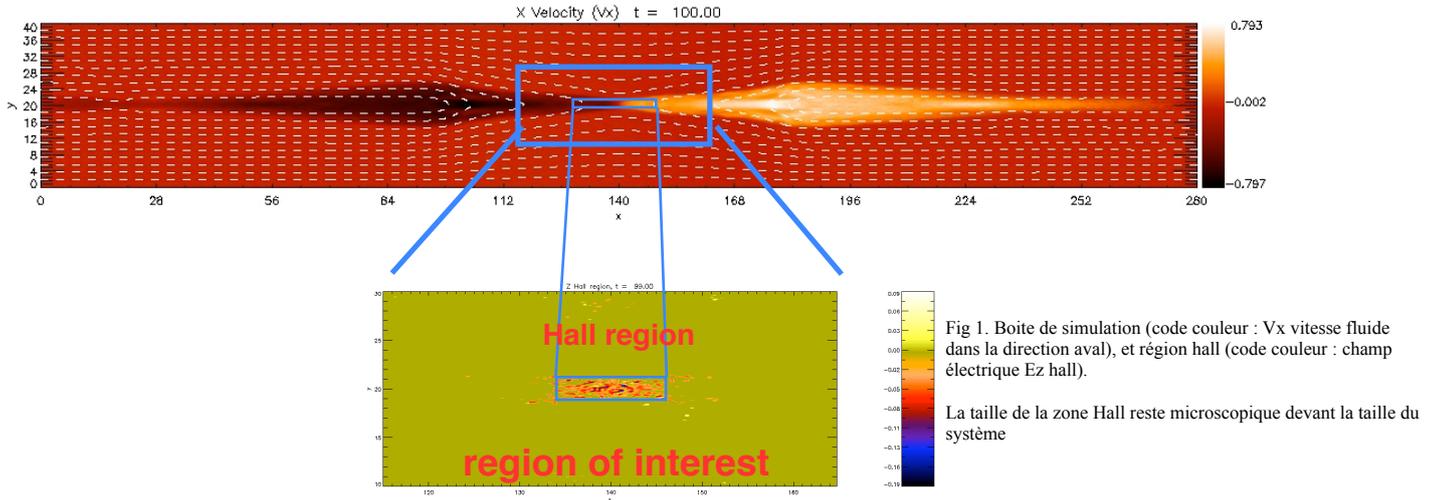


Fig 1. Boite de simulation (code couleur : V_x vitesse fluide dans la direction aval), et région hall (code couleur : champ électrique E_z hall).
La taille de la zone Hall reste microscopique devant la taille du système

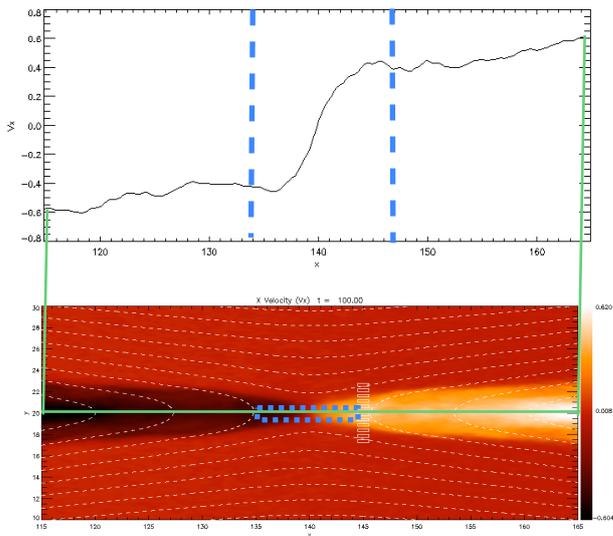


Fig 2. Vitesse aval des ions, on note la courte distance sur laquelle les ions sont accélérés, ainsi que la vitesse asymptotique.

2. Force de pression cinétique

Dans la région Hall, le mouvement des lignes de champ est assuré par le flot électronique. Les ions sont accélérés par les champs électriques et se couplent à nouveau au champ magnétique sur une certaine distance. Shay et al (2001) affirment que le plasma atteint la vitesse d'Alfvén sur cette distance via la force exercée par le champ électrique E_x (fig 3.). La figure 4 représente une coupe des différents termes de l'équation d'impulsion des ions calculés à partir de la simulation hybride. La coupe est effectuée là où le champ E_x existe. On voit qu'une force électrique positive s'exerce en effet sur le fluide ionique, mais on note également l'existence d'une force de pression localisée au même endroit et de signe opposé.

On peut remarquer sur cette figure que le terme non diagonal du tenseur de pression domine la structure de la force de pression sur les séparatrices. Nous verrons par la suite que ces termes non diagonaux ont pour origine le mouvement cinétique des ions dans cette région.

3. Fonctions de distributions et trajectoire des particules

En examinant les fonctions de distributions des ions dans la région Hall on s'aperçoit qu'elles présentent des corrélations positives ou négatives suivant que l'on se trouve d'un côté ou de l'autre de la ligne $B_x=0$. La figure 5 représente une succession de fonctions de distributions allant de l'amont en bas au centre de la couche de courant dans le jet. On remarque que la zone amont est caractérisée par un plasma maxwellien dérivant à la vitesse $E \times B$ tandis que les fonctions dans le jet sont plus complexes. La figure 6 présente la trajectoire d'une particule prise dans la troisième distribution. On montrera que cette orbite est le résultat d'une oscillation dans un puits électrostatique divergent et comment elle permet d'expliquer les distributions.

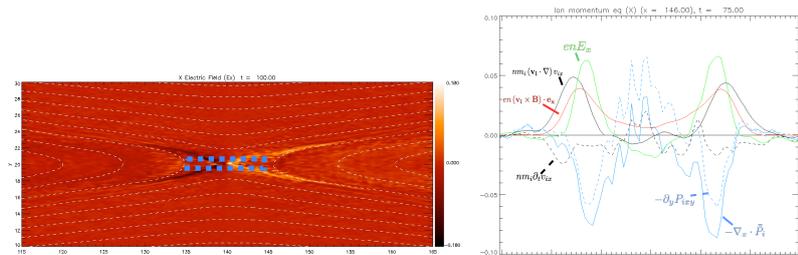


Fig 3. Champ électrique Hall dans la direction x (aval).

Fig 4. Bilan des forces fluides s'exerçant sur les ions dans la région Hall.

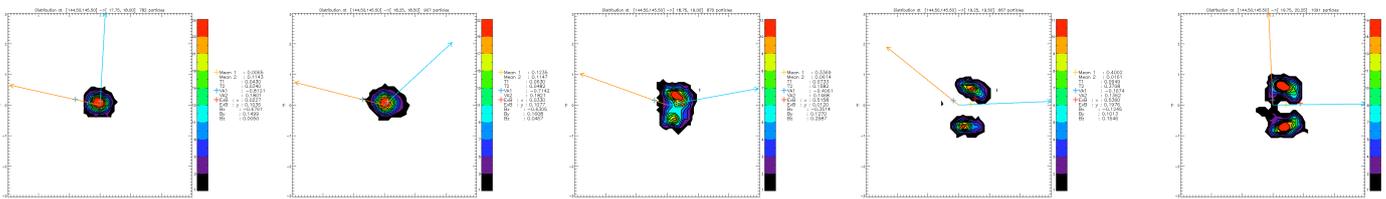


Fig. 5 fonction de distributions des ions. De gauche à droite : les deux premières se trouvent en amont, le plasma est Maxwellien et dérive à la vitesse $E \times B$. La troisième et la quatrième distribution sont dans le jet du côté $B_x < 0$, tandis que la dernière distribution est celle obtenue au centre. On notera la corrélation positive nette pour les 3eme et 4eme distributions.

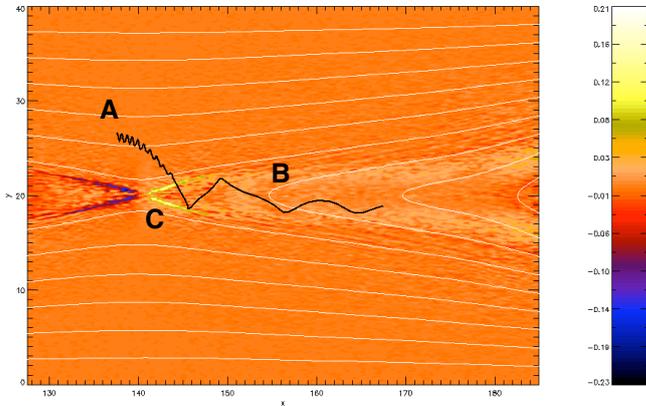


Fig 6. Trajectoire typique d'un proton venant de l'amont. Le proton effectue des rebonds sur les murs électrostatiques Hall et transfère une partie de l'énergie cinétique gagnée dans la direction de l'aval grâce à la divergence des "murs". On expliquera comment une distribution évaluée au point de rebond C doit être corrélée positivement dans le plan V_x - V_y .

4. Comparaisons avec une simulation bi-fluide

Les simulations numériques montrent depuis des années maintenant que le formalisme nécessaire et suffisant pour l'obtention d'un taux de reconnexion rapide est celui de la MHD-Hall. Dans ce formalisme il est souvent supposé que les ions ont une pression isotrope. Nous verront ici à l'aide d'une simulation bi-fluide quelles sont les différences dans les forces s'exerçant sur le fluide ionique.

Conclusion et perspectives

La reconnexion magnétique non collisionnelle est autorisée par les électrons mais sa dynamique est plutôt fixée par la réponse inertielle des protons. Nous avons montré que la compréhension de l'accélération ionique par les champs Hall est le résultat d'une oscillation dans un puits de potentiel électrostatique. Du point de vue cinétique les ions ne transfèrent qu'une partie de l'énergie cinétique gagnée dans la direction de l'aval, l'autre partie est transférée en perpendiculaire (chauffage) lorsque le proton se re-magnétise. Du point de vue fluide, cet effet apparaît dans un terme non diagonal du tenseur de pression et ne peut être traité par un code bi-fluide avec lequel nous avons établi des comparaisons.

Des observations dans la queue de la magnétosphère, où les ions froids d'origine ionosphérique sont transportés dans la région équatoriale par la reconnexion, ont montré des fonctions de distributions semblables à celles que nous présentons ([11]), et pour lesquelles l'auteur donne une interprétation similaire. La structure particulière du tenseur de pression émane directement de la dynamique oscillante des protons dans cette région, un calcul du tenseur dans les données satellites nous permettrait d'apporter un argument de plus dans la direction de l'auteur.

Références

- [1] Kuznetsova et al. JGR 1996 Ion dynamics in hybrid simulation of magnetotail reconnection
- [2] Nakabayashi et al. GRL 1997 Electromagnetic hybrid code simulation of magnetic reconnection : velocity distribution functions of accelerated ions
- [3] nakamura JGR 1998 Ion dynamics and resultant velocity space distributions in the course of magnetotail reconnection
- [4] Lottermoser JGR 1998 Ion kinetic effects in magnetic reconnection : Hybrid simulations
- [5] Nagai et al. PhPI 2002 Counterstreaming ions as evidence of magnetic reconnection in the recovery phase of substorms at the kinetic level
- [6] Arzner et al JGR 2001 : Hybrid simulations of the post plasmoid plasma sheet during magnetotail reconnection
- [7] Hoshino et al JGR 1998 Ion dynamics in magnetic reconnection : comparison between numerical simulations and geotail observations
- [8] Lyons et al JGR 1982 : Evidence for current sheet acceleration in the geomagnetic tail
- [9] Shay et al JGR 2001 : Alfvénic collisionless magnetic reconnection and the Hall term
- [10] Karimabadi et al GRL 2007 : Multiscale structure of the electron diffusion region
- [11] Wygant et al JGR 2005 : Cluster observations of an intense normal component of the electric field at a thin reconnecting current sheet in the tail and its role in the shock-like acceleration of the ion fluid into the separatrix region