

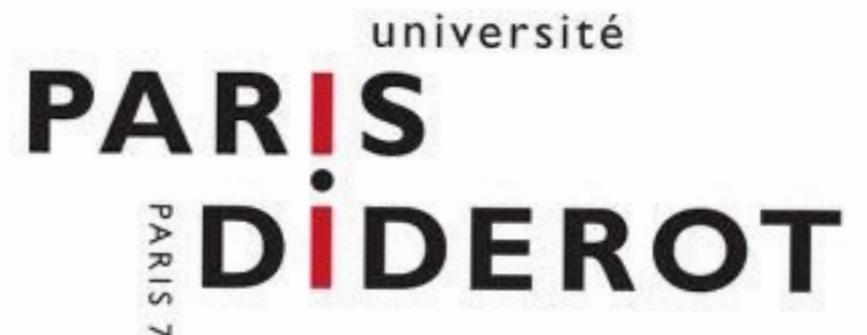
Simulation numérique HP @ PNHE

Panorama et perspectives

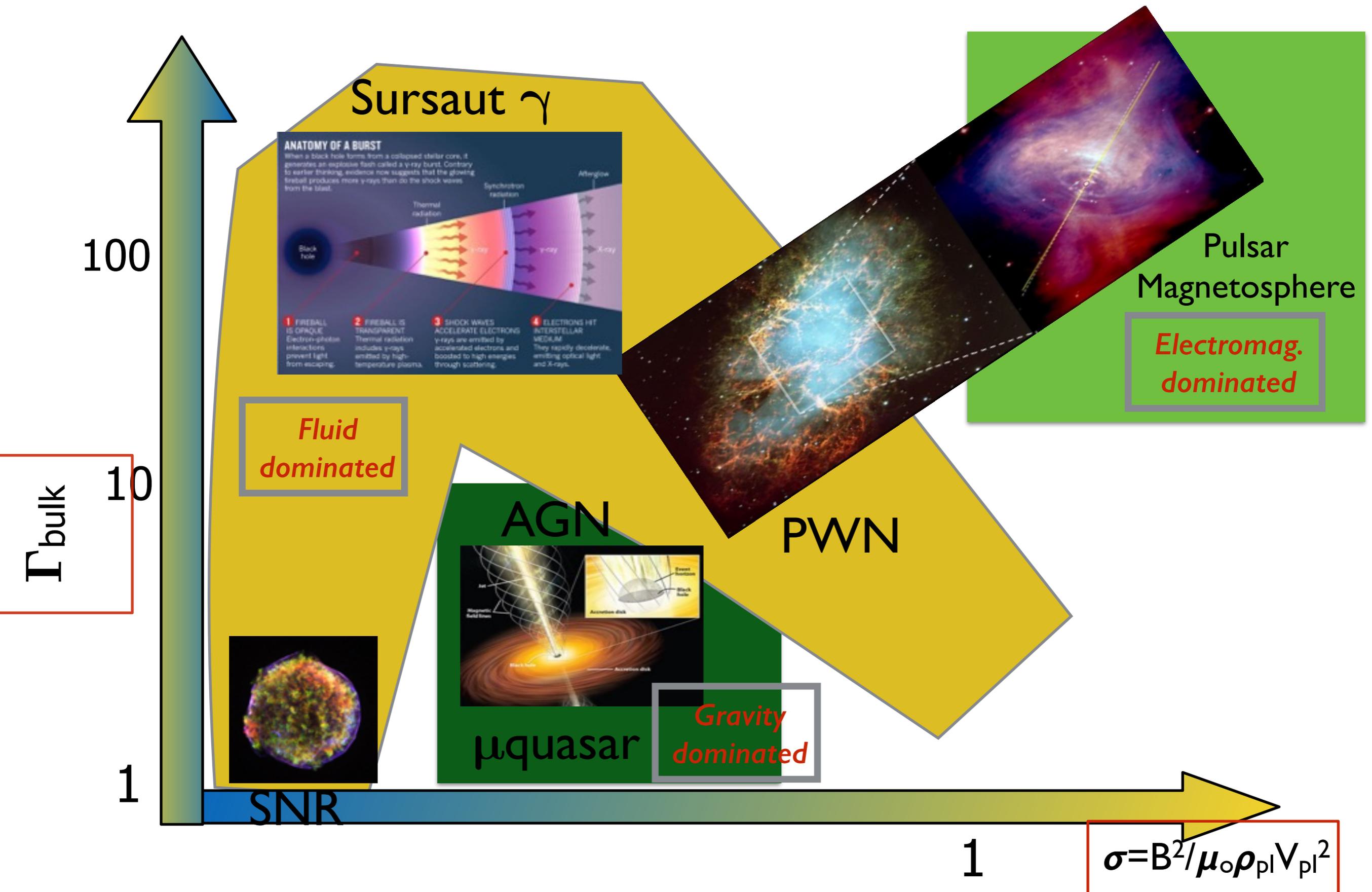
Fabien CASSE

Laboratoire Astroparticule & Cosmologie (APC)

Journées PNHE - 30 & 31 mars 2016 - Université Paris Diderot



Les plasmas en haute énergie



Principales méthodes numériques @ PNHE

MHD

- Description d'un fluide moyen (NR ou relativiste) neutre et son interaction avec un champ électromagnétique.
- + Description à grande échelle
- + Permet de prendre en compte la gravité d'un objet central (classique ou relativité générale)
 - Pas de prise en compte des particules supra-thermiques !!
 - Pas de description de la turbulence à petite échelle...

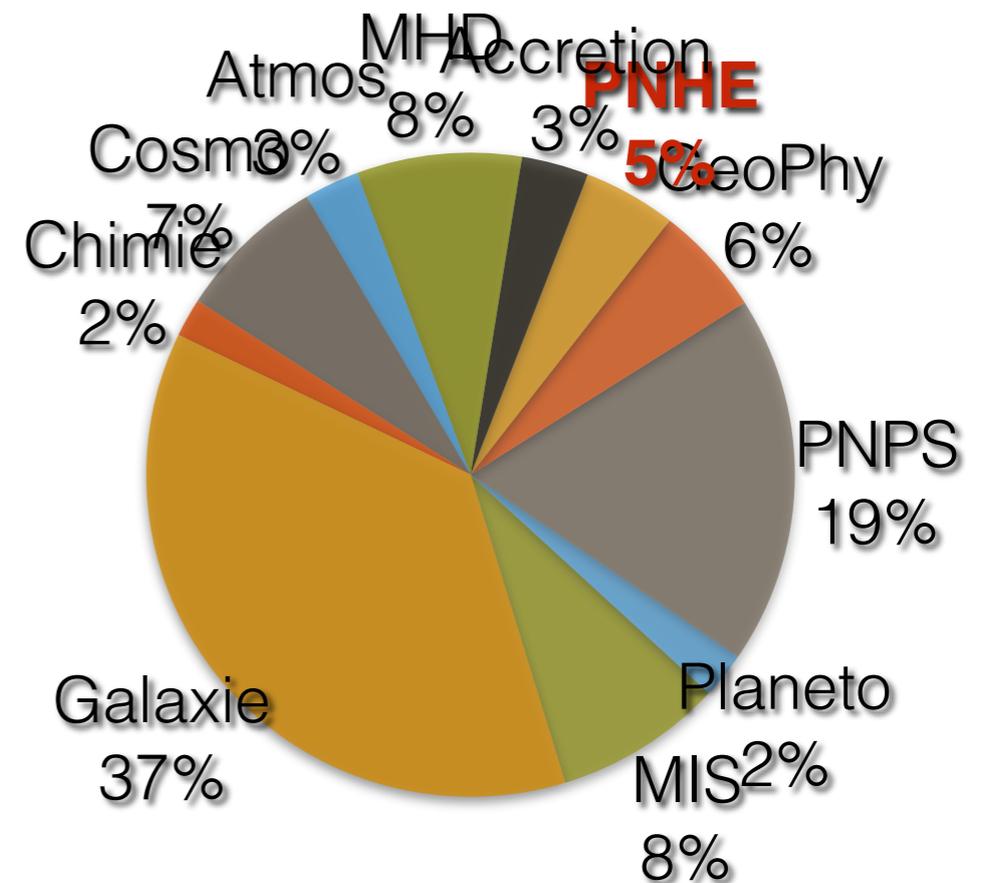
Particle-In-Cell (PIC)

- Description dynamique d'un ensemble de macro-particules chargées et de son interaction avec un champ électromagnétique (Maxwell).
 - Prise en compte de la gravité difficile
 - Bcp de particules ($< 10^{10}$)
—> limitation sur la taille physique des simulations...
- + Description de la microphysique
- + Description auto-cohérente de la production de turbulence magnétique et de l'accélération de particules.

La complexité des processus HE nécessitent des moyens de calcul haute performance (MPI et supercalculateurs)

PNHE @ GENCI

- ➔ GENCI = Grand Equipement National de Calcul Intensif → Groupement de trois centres de calcul français == IDRIS (CNRS), TGCC (CEA) et CINES (Universités).
- ➔ Parmi les 10 comités, l'astrophysique est regroupée avec la géophysique (CT4 présidé par E. Audit).
- ➔ En 2016, 64 projets au CT4 ont reçu une allocation de temps de calcul pour une allocation totale de 164 Mh.
- ➔ 7 projets relevant du PNHE.
- ➔ Thématiques du PNHE @ GENCI:
 - Accélération de particules (Lemoine, Cerutti, Walder)
 - Accrétion sur objets compacts (Meliani, Casse, Walder)
 - Physique des objets compacts (Foglizzio, Grandclément)



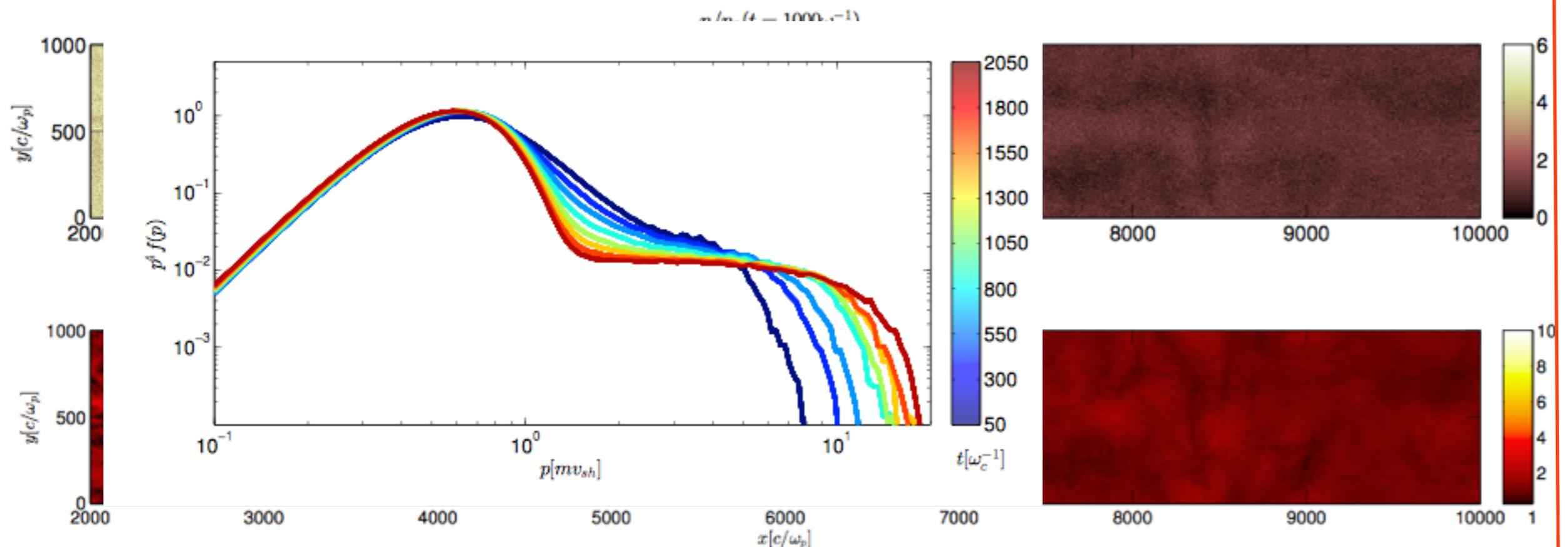
Deux illustrations ...

I Accélération de particules dans les plasmas magnétisés

II Accrétion autour des objets compacts

Accélération de particules et plasmas magnétisés

- ➔ L'accélération de particules dans les plasmas est un problème multi-échelle nécessitant de décrire à la fois l'accélération des particules et la génération de turbulence magnétique et/ou reconnexion magnétique.
- ➔ L'utilisation de codes PIC en astrophysique des hautes énergies a permis d'aborder l'accélération de façon auto-cohérente (cf Spitkovsky 2008 pour chocs relativistes).
- ➔ Thématique dominée par les US dans les années suivantes (Riquelme & Spitkovsky (2010, 2011) pour chocs non-relativistes, Sironi (2011) et Sironi & Spitkovsky (2011) pour les chocs relativistes).

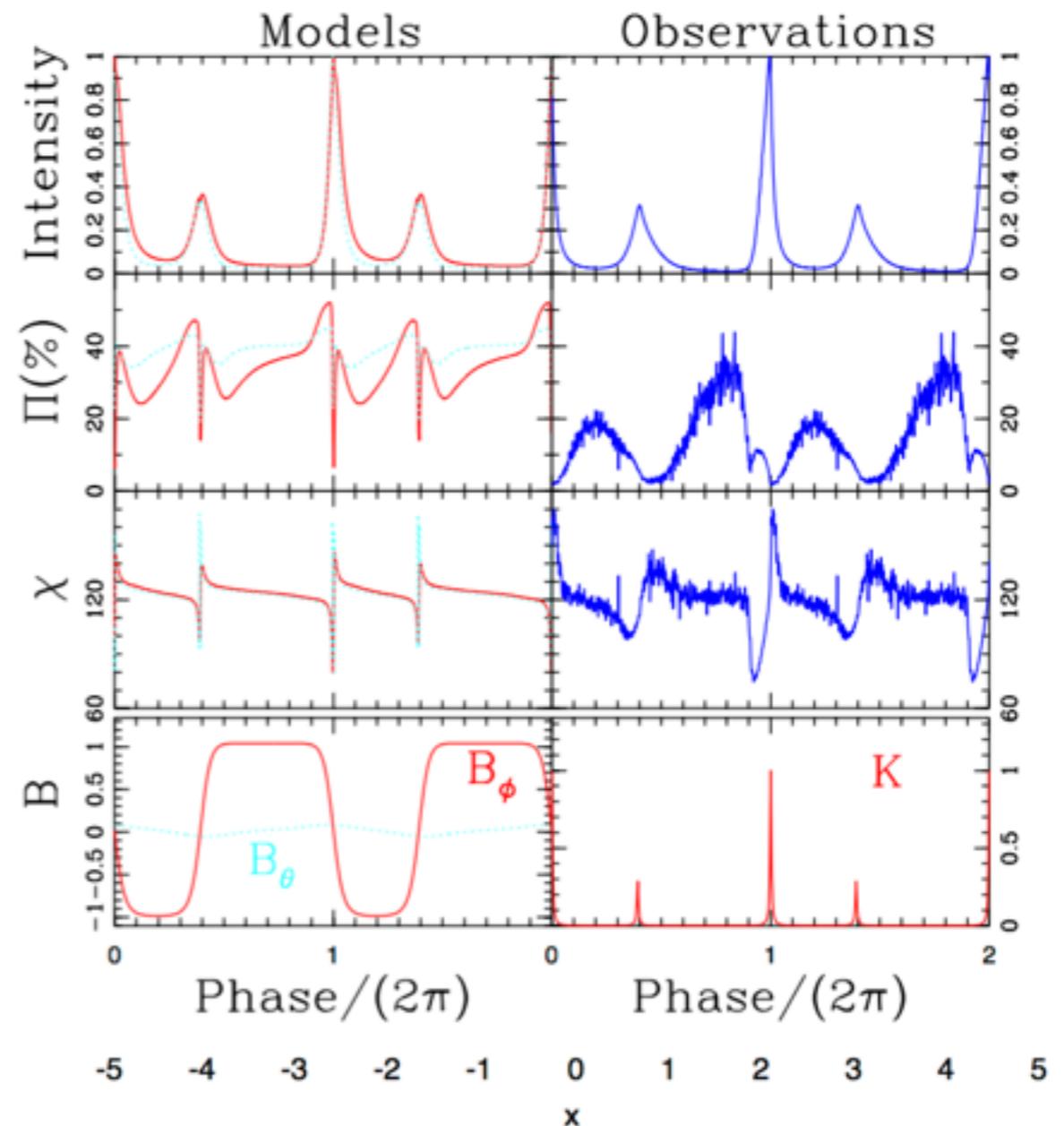


Nébuleuse de Pulsar @ PNHE

- ➔ Modèle en vogue pour le vent de pulsar: Striped Wind (Lyubarsky & Kirk 2001, Petri & Kirk 2005, Petri & Lyubarsky 2007, ...)
- ➔ Modélisation Force-free en RMHD Idéale (code MPI RMHD volume fini & spectral)

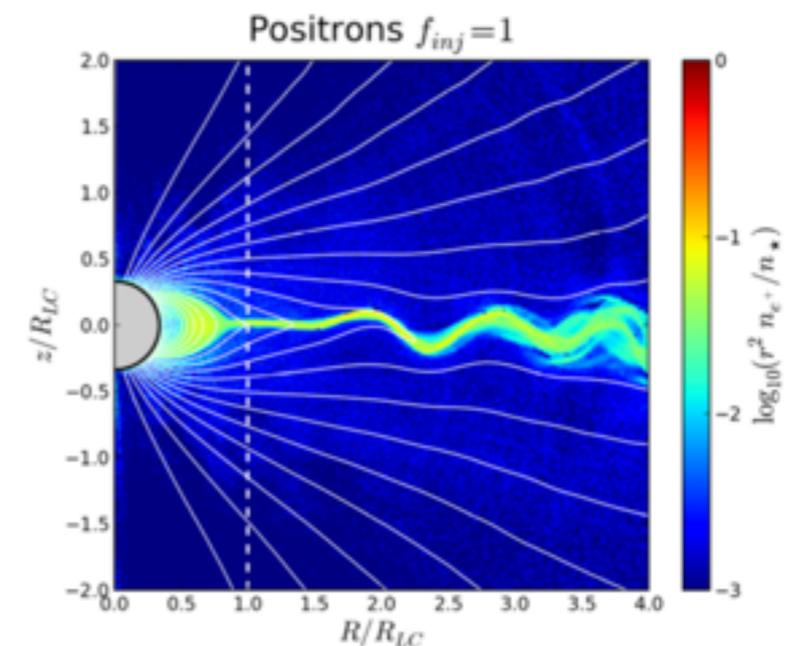
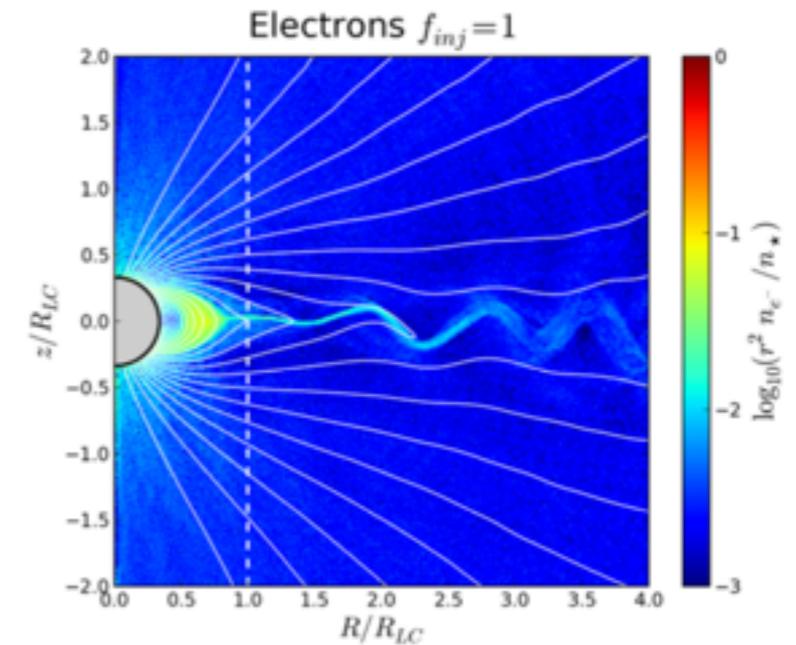
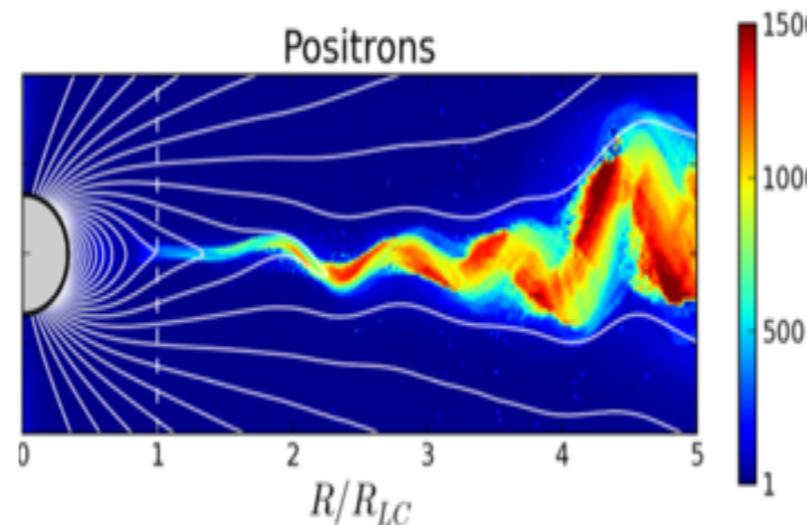
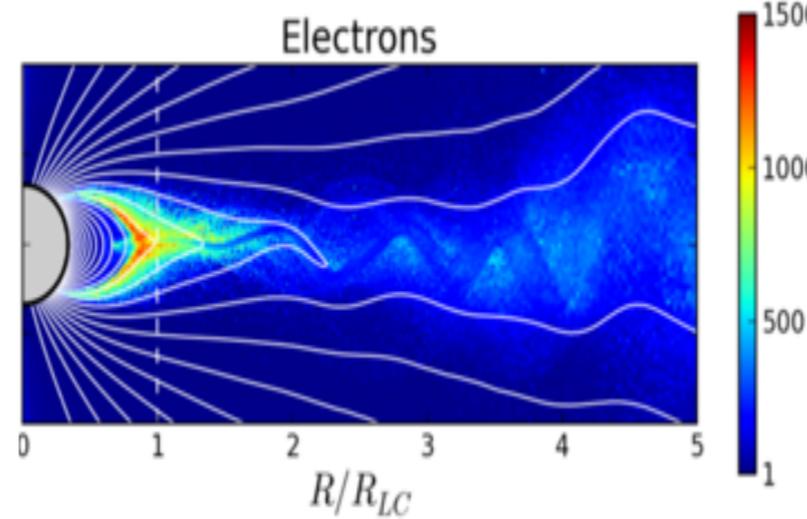
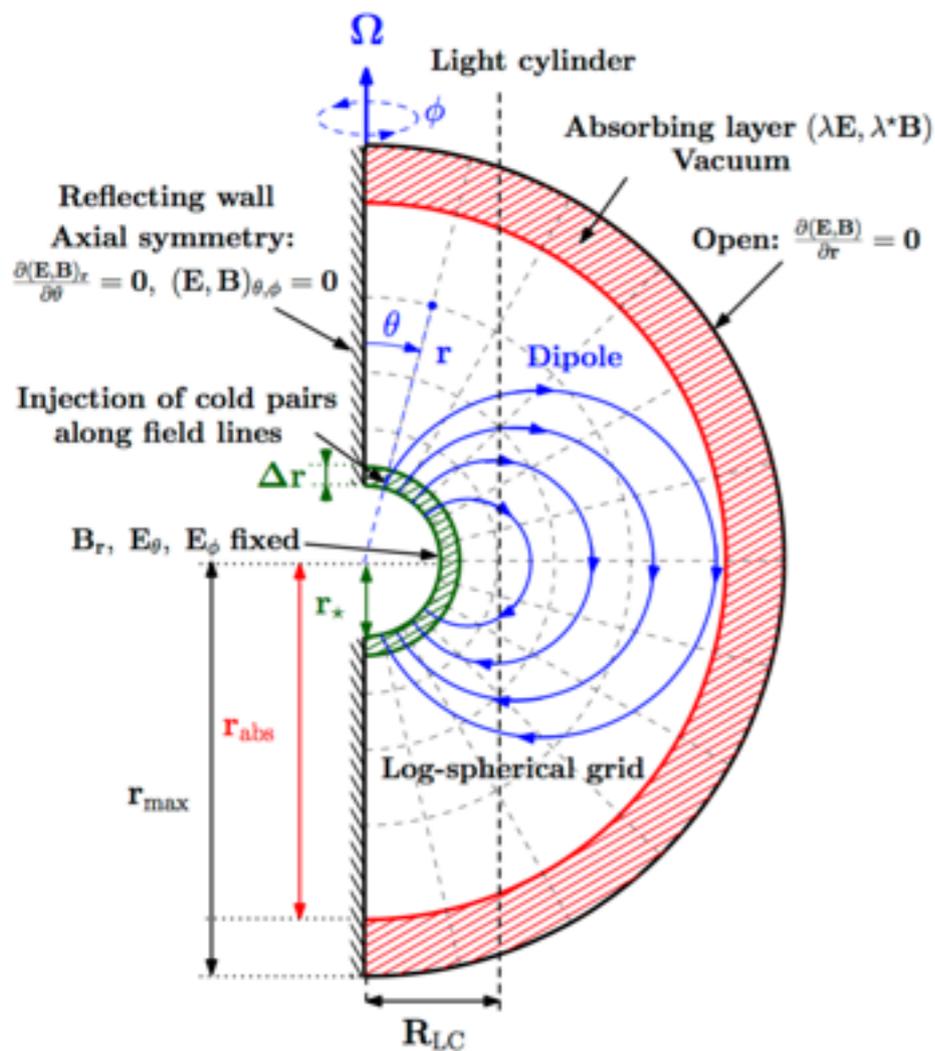


Pétri (2012)



Nébuleuse de Pulsar @ PNHE

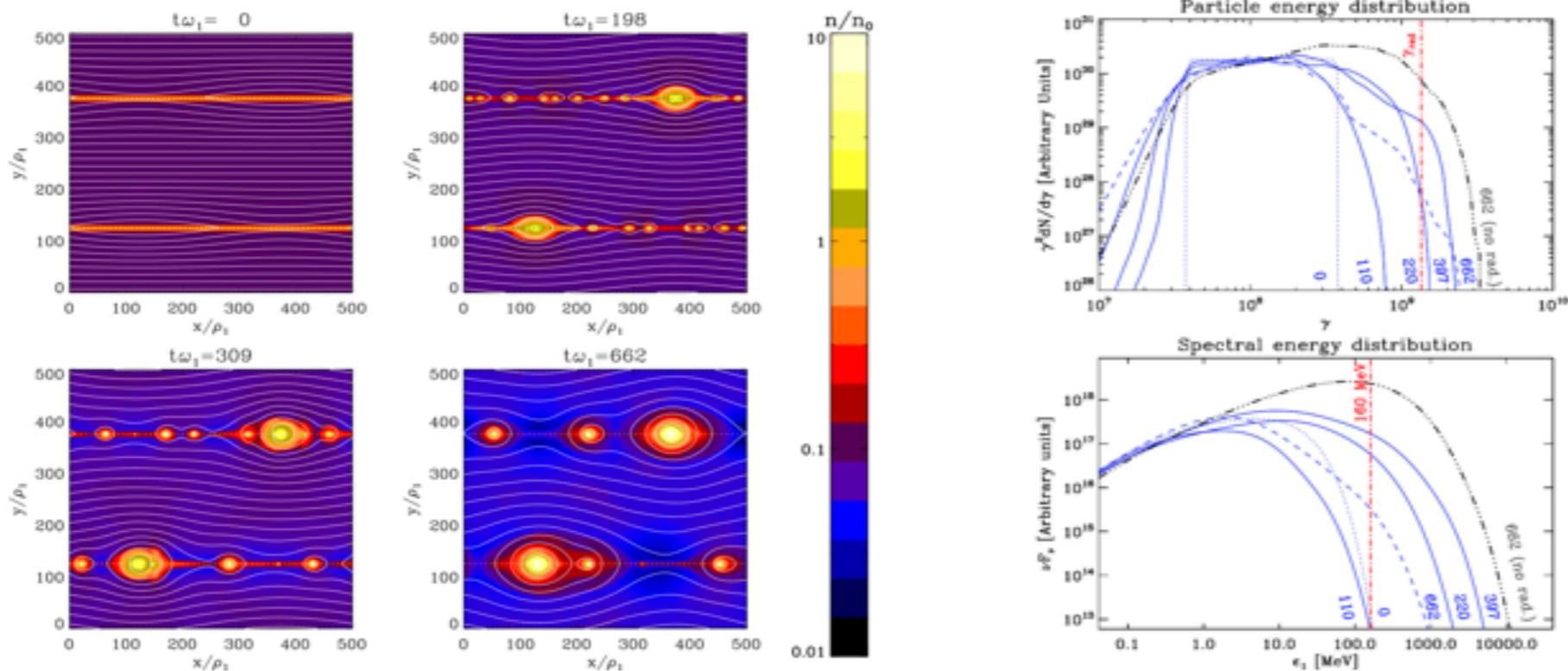
- ➔ Approche PIC permet de prendre en compte l'inertie des particules et leur accélération tout en résolvant la structure électromagnétique.
- ➔ Code MPI PIC Zeltron (grille sphérique avec pas logarithmique, Cerutti et al 2013)



Reconnexion magnétique @ PNHE

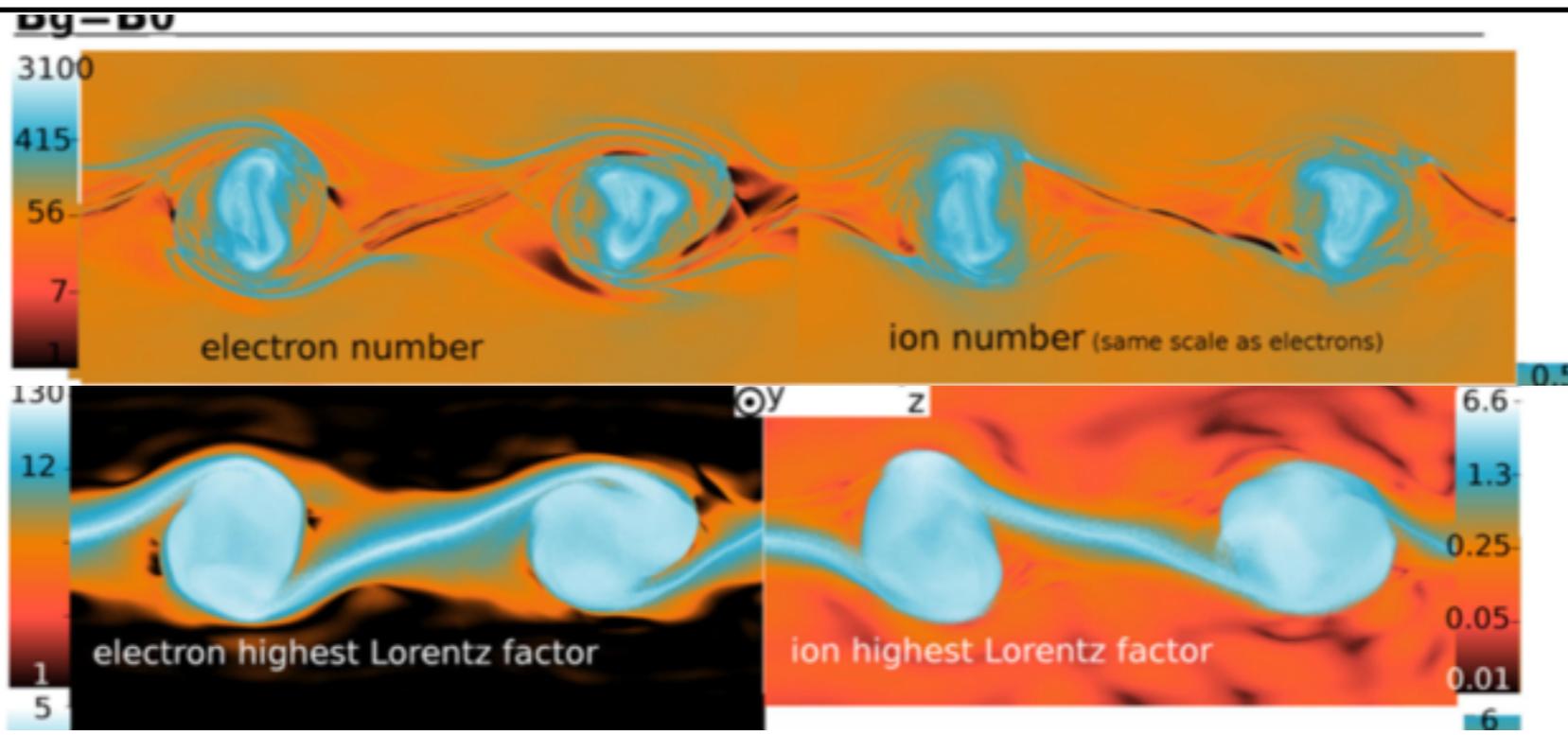
- ➔ Reconnexion magnétique —> permet de convertir l'énergie magnétique en énergie cinétique pour les particules (e.g. émission gamma des PWN)

Pair plasma e+-e-



Cerutti et al. (2013)

Ion-electron plasma



Melzani et al. (2014)

Perspectives sur l'accélération

- ➔ Codes PIC astrophysiques pourraient bénéficier de l'expertise acquises dans d'autres domaines utilisant les PIC (coll. colombiennes, rayonnement, QCD, création de paires, etc...)
- > Par exemple dans la communauté Laser-Plasma (Cf code CALDER développé au CEA (L. Gremillet) - Projet ANR Mach (Marcowith, Lemoine, Casse, Pelletier, Gremillet, Tikonchuk, d'Humières,...).
- ➔ Pour élargir le champ d'action, il faut conjuguer plusieurs méthodes pour s'affranchir des limitations numériques
 - Approche Hybride PIC - MHD où le fluide thermique et le champ EM sont gérés par la MHD et les particules HE par les PIC (remodelage de la loi d'Ohm... Cf Bai et al. 2015, Casse & Van Marle 2016 (in prep)).
 - Codes MHD - Vlasov/Fokker-Planck (e.g. Reville & Bell (2014))
 - Codes hybride PIC/fluides (Gargaté & Spitkovsky 2012)
- ➔ Une approche cinétique du problème pourrait être faite avec des codes purement Vlasov-Maxwell —> nécessité d'acquérir un savoir-faire encore inconnu au PNHE..
- ➔ Les collaborations trans-disciplinaires pourraient ouvrir de nouvelles voies (codes Vlasov-Maxwell déjà utilisés en plasmas de laboratoire).

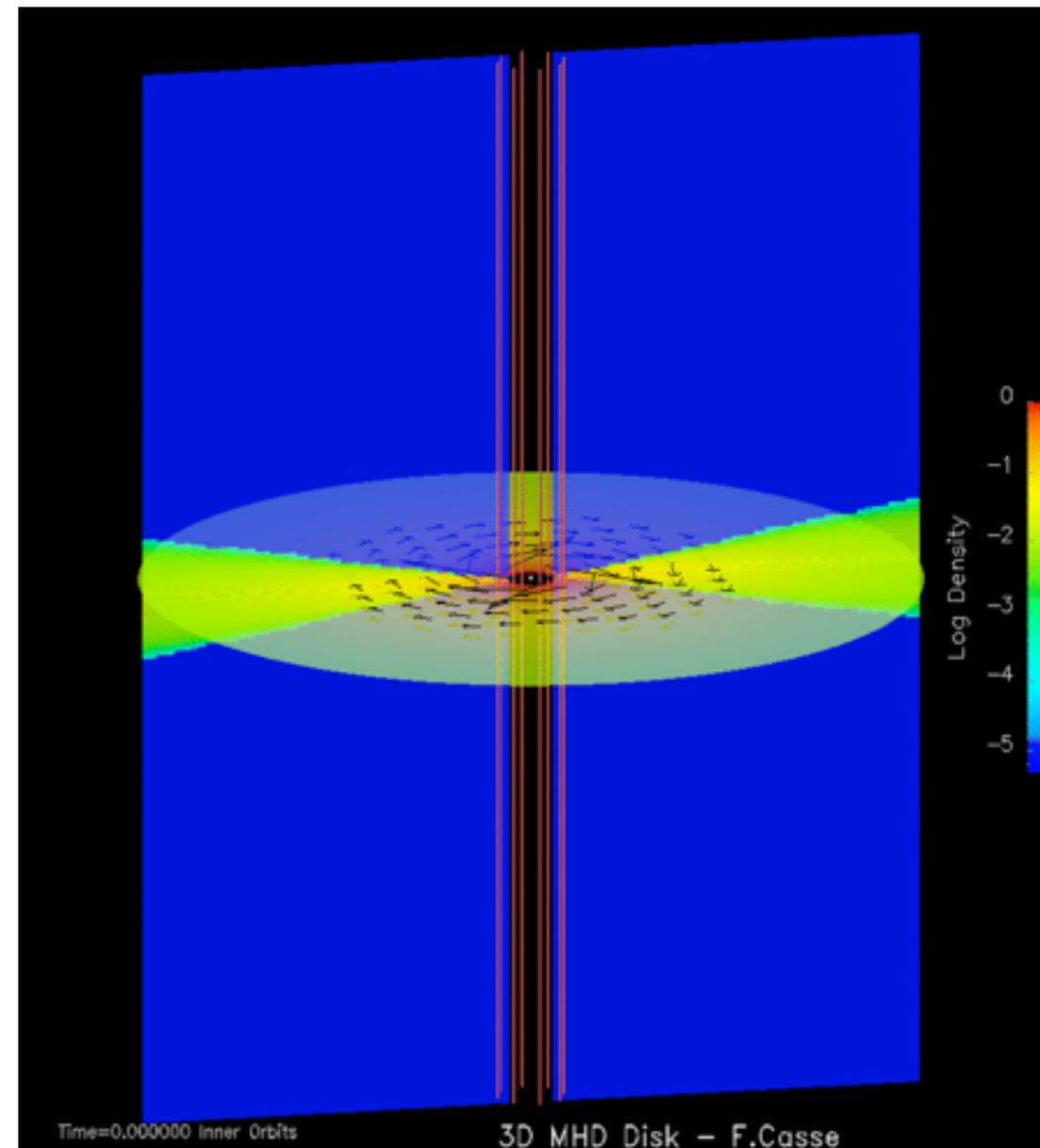
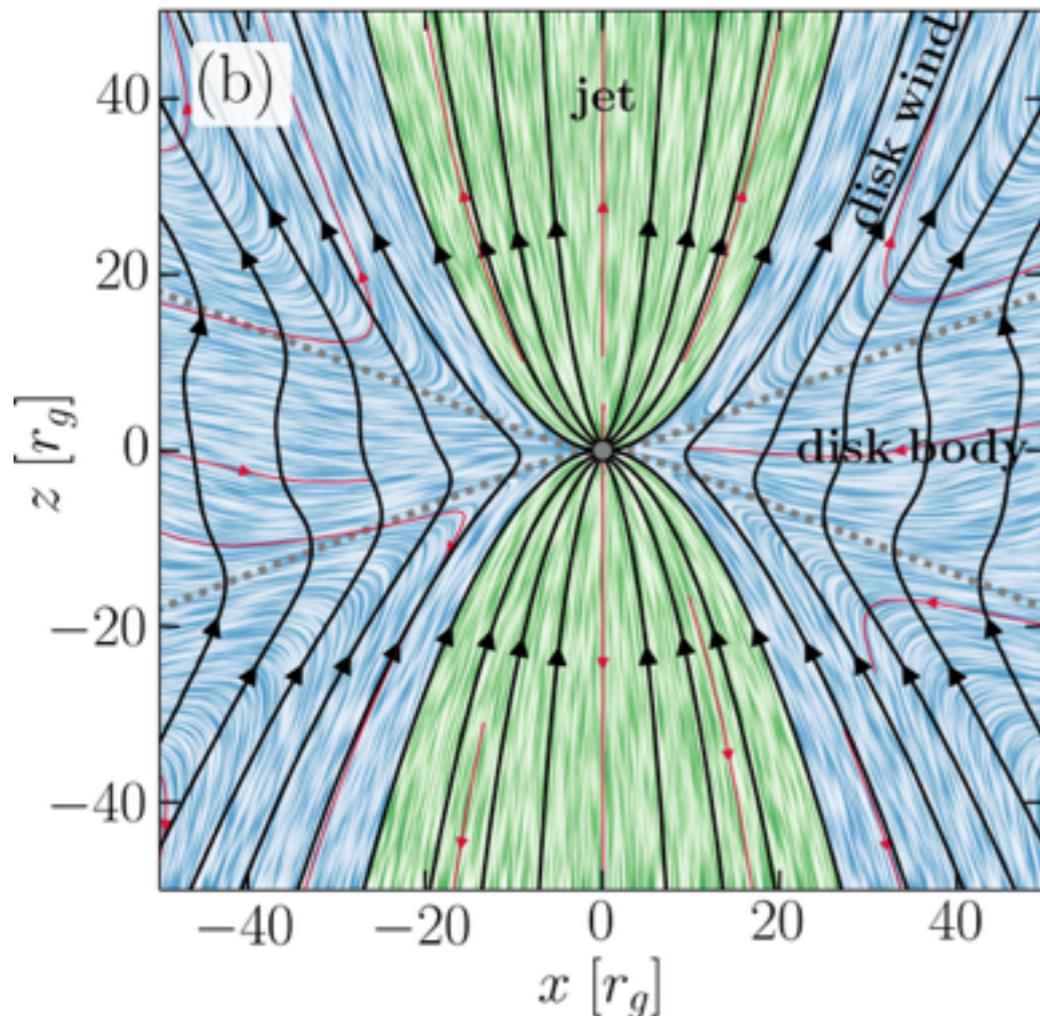
Deux illustrations ...

I Accélération de particules dans les plasmas magnétisés

II Accrétion autour des objets compacts

Accretion-ejection sur objets compacts

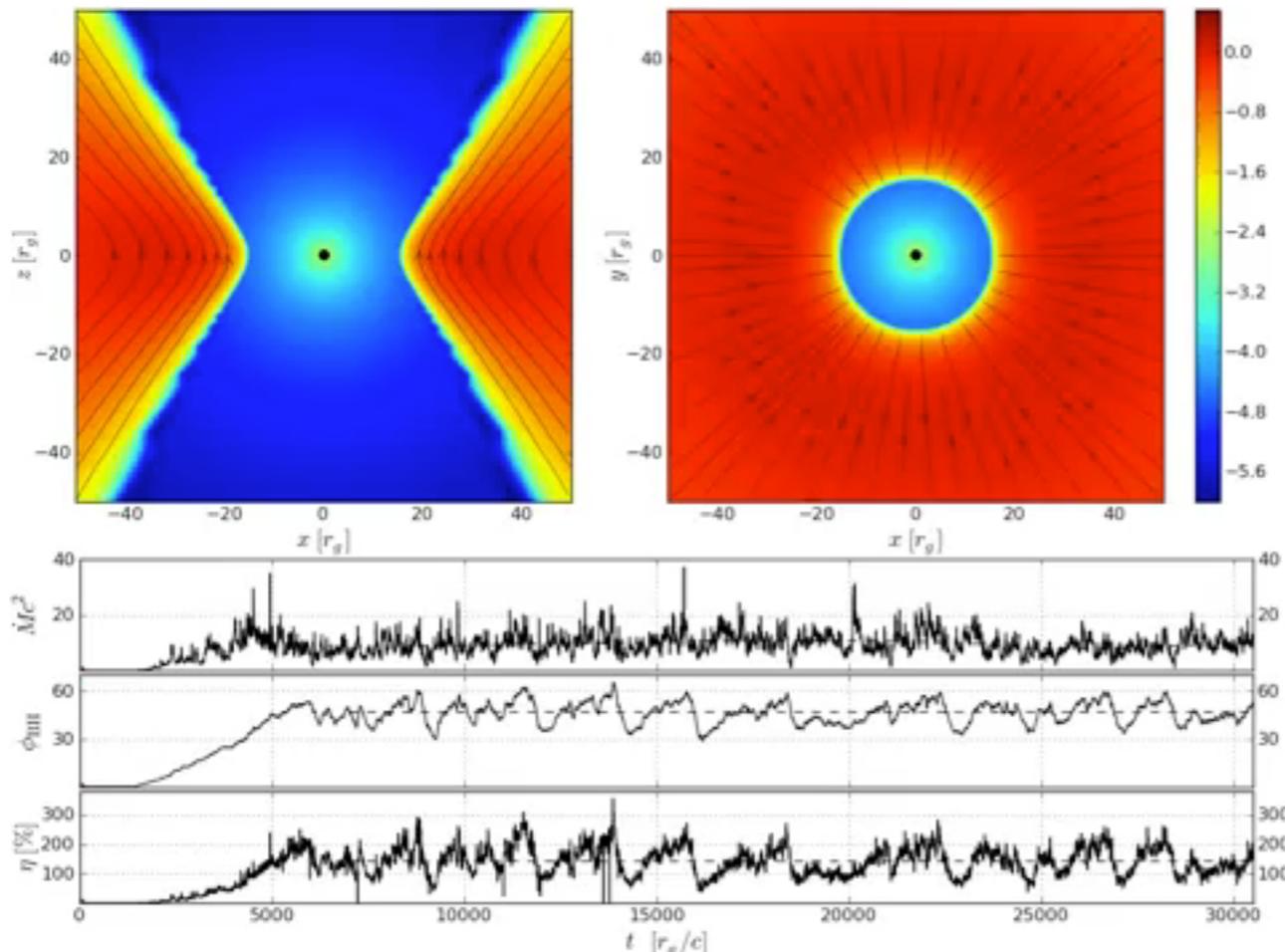
- Les jets issus des systèmes compacts présentent souvent plusieurs composantes.
- Enveloppe externe \rightarrow Jets lié au disque d'accrétion.
- Jet interne \rightarrow Particules de haute énergie (jet propulsé par trou noir en rotation ?)
- Nécessité de décrire l'écoulement de matière près de l'horizon de l'objet compact.



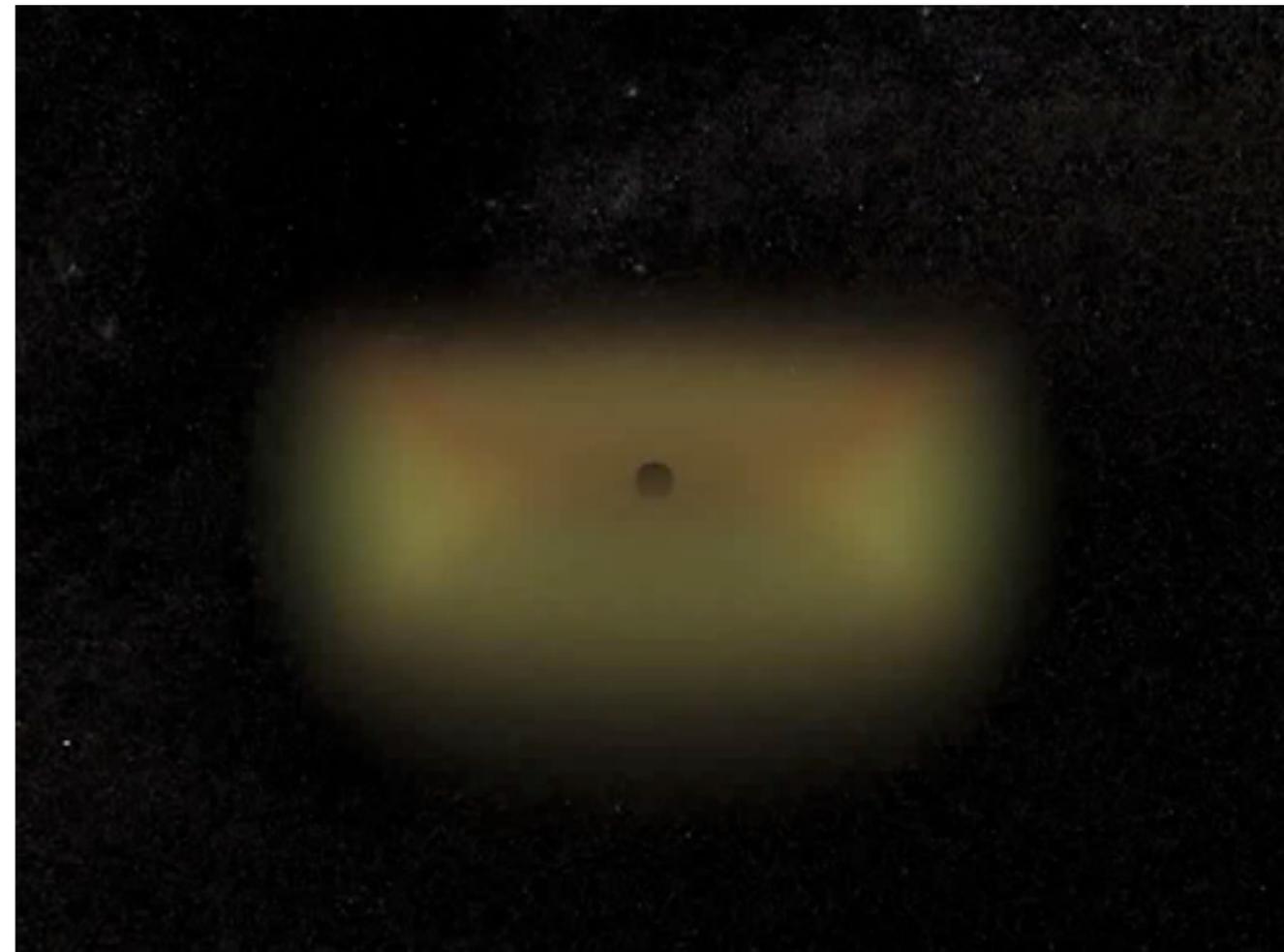
Casse & Keppens (2004)

Accretion-ejection sur objets compacts

- Dans la dernière décennie, des codes GRMHD ont été développés pour décrire l'interaction entre un plasma magnétisé et un trou noir en rotation lente (e.g. McKinney 2006, Hawley 2011, McKinney et al. 2013) ou en rotation rapide (Penna et al. 2013). Postprocessing des simulations GRMHD apportent des observations synthétiques à comparer à aux observations (e.g. Ryan et al. 2015, Moscibrodzka et al. 2016).
- La communauté française a acquis un gros retard sur cette thématique !



Tchekovskoy et al. (2013)

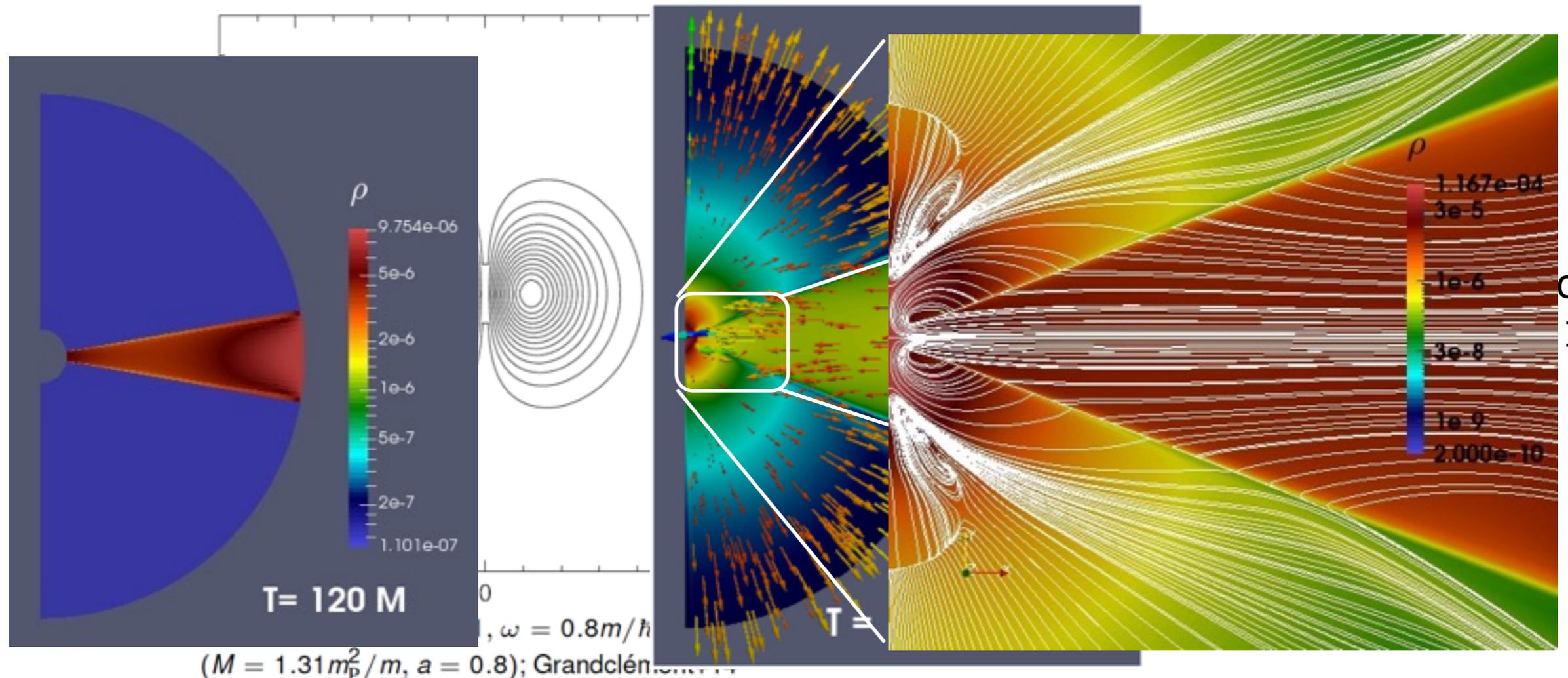


McKinney et al. (2012)

Accretion-ejection sur objets compacts @ PNHE

- Nouveau code GRMHD développé avec prise en compte de n'importe quel type de métrique de relativité générale (LUTh/APC).
- —> Application du savoir-faire sur les instabilités (QPOs) et l'accrétion-éjection en GRMHD
- —> Test des modèles d'objets compacts pour les candidats trous noirs...
- GRMHD : Version RG de MPI-AMRVAC couplé à la librairie KADATH (Grandclément 2010)

Meliani et al.(2016)



Trou noir

vs

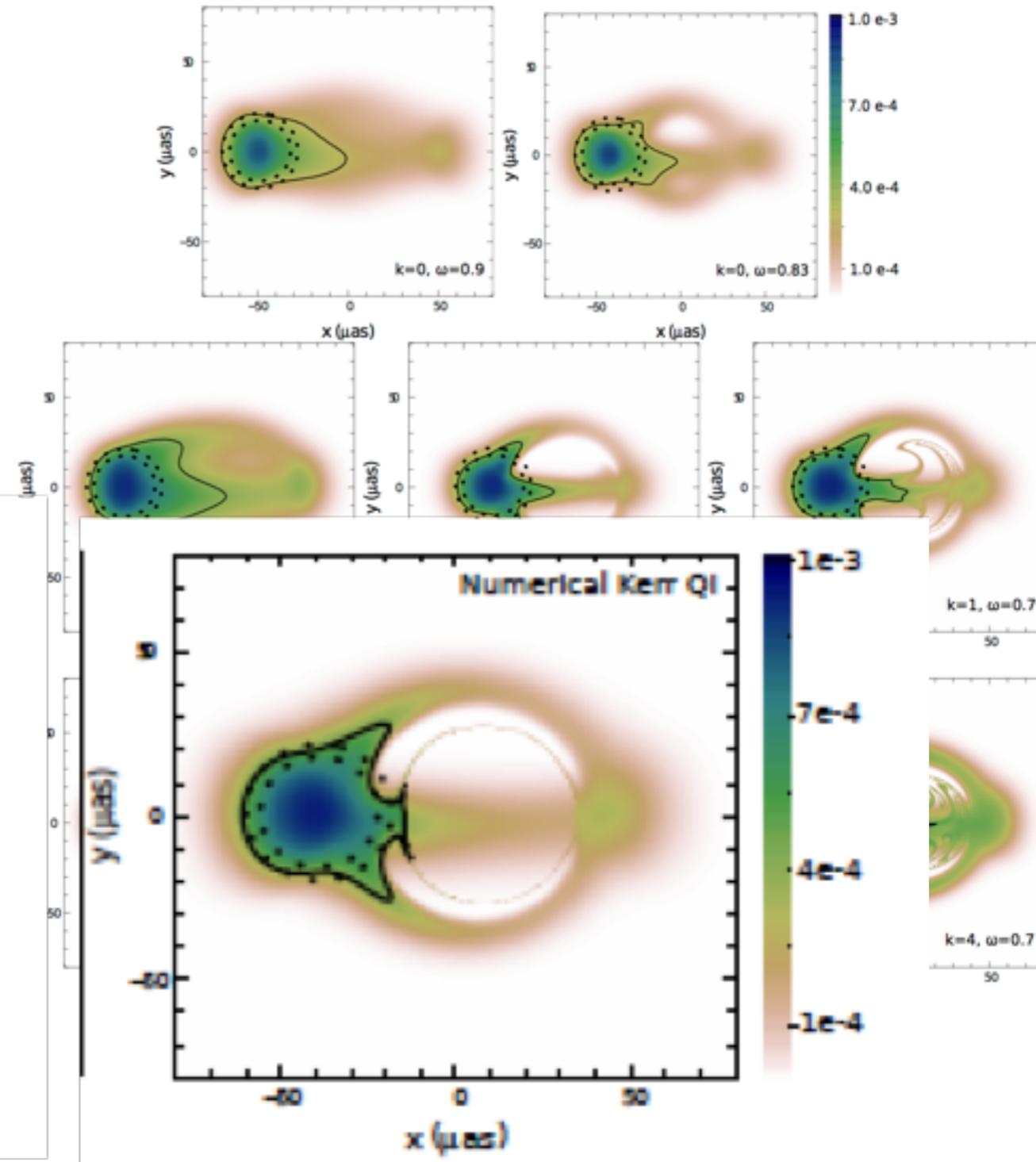
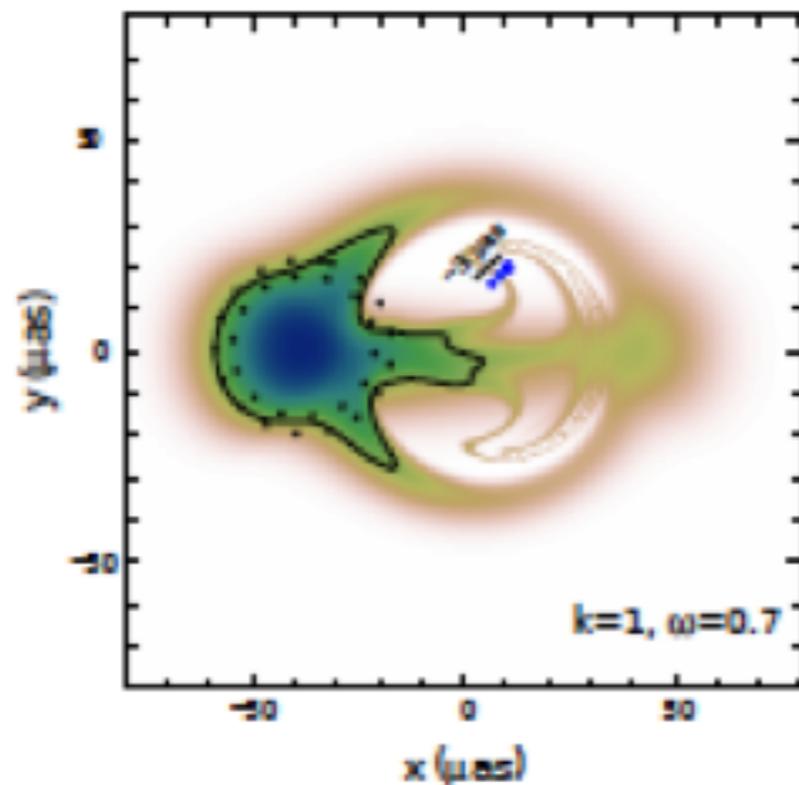
Etoile bosonique

on
1!!)

Observatoire numérique GRMHD @ PNHE

- Code GYOTO (Vincent et al. 2011) → Code de tracé de rayons RG, public développé au LUTH → permet de produire des observations synthétiques.
- SgrA* → comparaison de l'image d'un tore autour d'un trou noir et de plusieurs modèles d'étoile bosonique...

Vincent et al. (2016)



Perspectives sur l'accrétion/éjection en RG

- ➔ La description des écoulements d'accrétion/éjection au contact des objets compacts a progressé grâce aux simulations GRMHD.
- ➔ Les simulations n'ont abordé qu'une partie des simulations envisageables (e.g. disques minces, instabilités dans les disques) : la complexité des simulations est un obstacle à la bonne compréhension des phénomènes.
- ➔ Des processus de dissipation (résistivité, viscosité) sont maintenant inclus pour se rapprocher des simulations accrétion/éjection ET pour charger en baryon les jets propulser par les trous noirs.
- ➔ Ces environnements sont propices à l'accélération de particules —> couplage avec des description cinétiques pour l'accélération ??
- ➔ Inclure la production de particules secondaires (gamma, neutrinos HE ?).
- ➔ Avec l'observation des ondes gravitationnelles, les simulations GRMHD prenant en compte des métriques dépendantes du temps pourraient permettre d'étudier l'influence de ces ondes sur le plasma environnant les trous noirs en coalescence...

Simulation numérique & PNHE

- ➔ Le PNHE a soutenu l'activité de simulation au travers du financement de projets/collaborations dont c'est quelque fois le seul financement.
- ➔ Ouverture à d'autres communautés plasma grâce à l'organisation de conférences (ex: Workshop sur accélération de particules avec communauté Laser-Plasma et la communauté plasma magnétosphériques).
- ➔ Appui du PNHE pour l'organisation d'une école sur les techniques numériques en HE —> Intérêt pour former à l'utilisation de codes des étudiants en thèse pour développer des liens simulations-modélisation-observations.
- ➔ Nécessité de maintenir un savoir-faire en accord avec les innovations technologiques (ex. GPGPU) —> Formations professionnelles au calcul scientifique financées par le PNHE (Maisons de la Simulation) ?