

Portrait d'un développeur de l'ESR

François Rincon

Chargé de Recherches CNRS

Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie, Toulouse

Spécialité: physique des champs magnétiques dans l'Univers



- *Unité mixte de recherche CNRS/Université Paul Sabatier*
 - *laboratoire créé en 2011, issu de la fusion LATT/CESR/DTP*
 - *plus gros laboratoire français en Sciences de l'Univers (300 personnes)*

- *Thématiques scientifiques très variées*
 - *Géophysique, Planétologie, Plasmas Spatiaux (GPPS)*
 - *Galaxies, Hautes énergies, cosmologie (GAHEC)*
 - *Physique du Soleil et des Etoiles (PSE)*
 - *Milieu Interstellaire et Cycle de la Matière (MICMAC)*
 - *Signal et de l'Image pour SdU (SISU)*

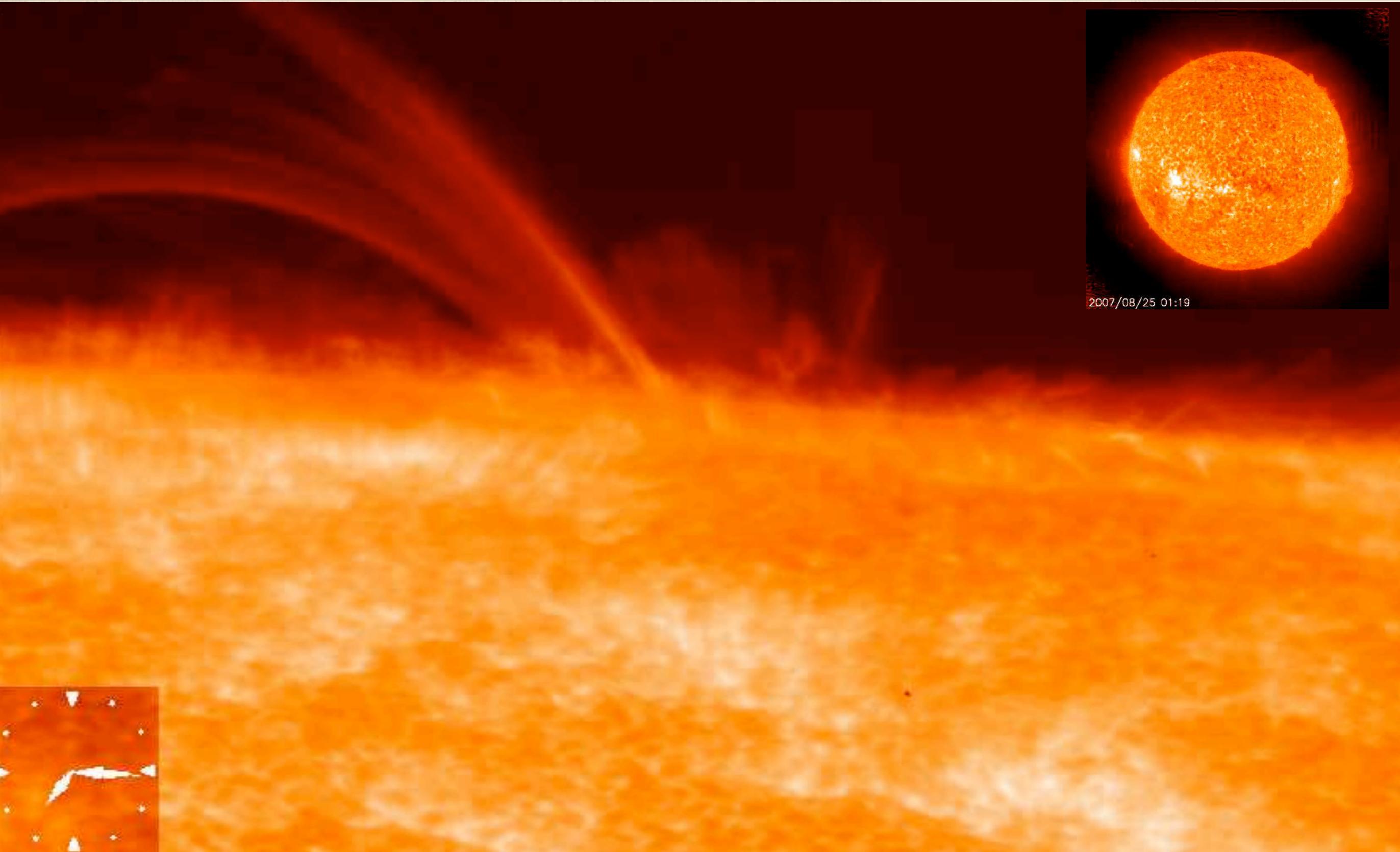
- *Des activités de recherche très diversifiées*
 - *observations sol et spatial*
 - *instrumentation pour les télescopes et satellites scientifiques*
 - *modélisation numérique et théorie*

Mon métier

- *Comprendre la physique des champs magnétiques dans différents environnements astrophysiques (étoiles, disques d'accrétion, amas de galaxie, etc.)*
 - *comment sont-ils créés ?*
 - *quelle est leur dynamique ?*
 - *quelles sont leurs interactions avec leur environnement ?*

- *Deux approches complémentaires*
 - *théorie*: magnétohydrodynamique et physique des plasmas
 - *simulation numérique* : effet dynamo, turbulence magnétisée

L'Univers magnétique : le Soleil



L'Univers magnétique : le Soleil

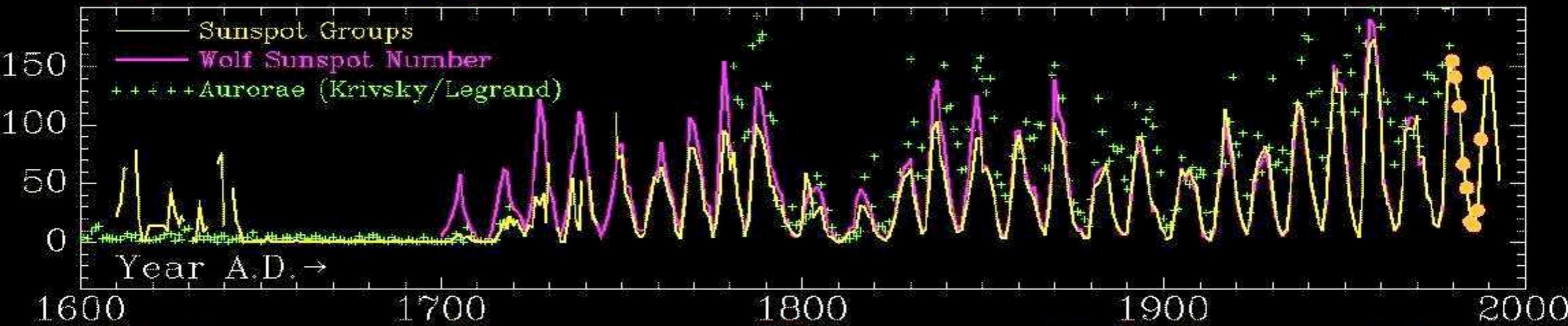
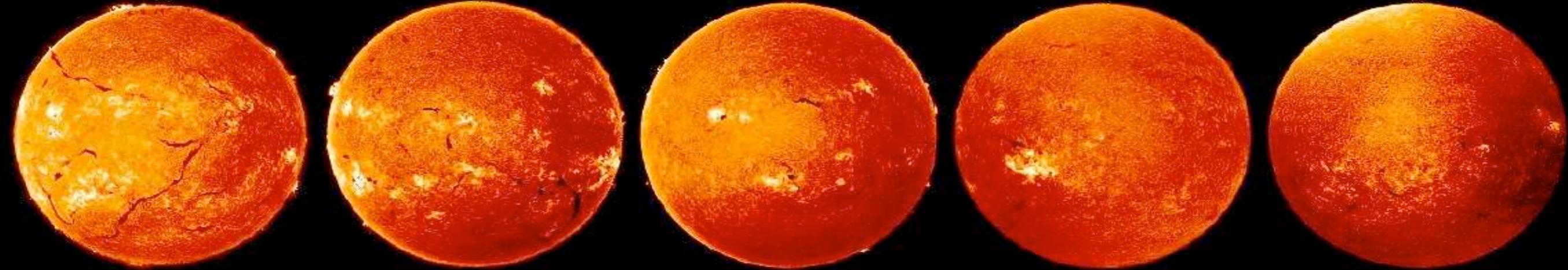
11 Aug 1980

14 Aug 1981

23 Aug 1982

11 Aug 1983

14 Aug 1984



10 Jul 1985

15 Aug 1986

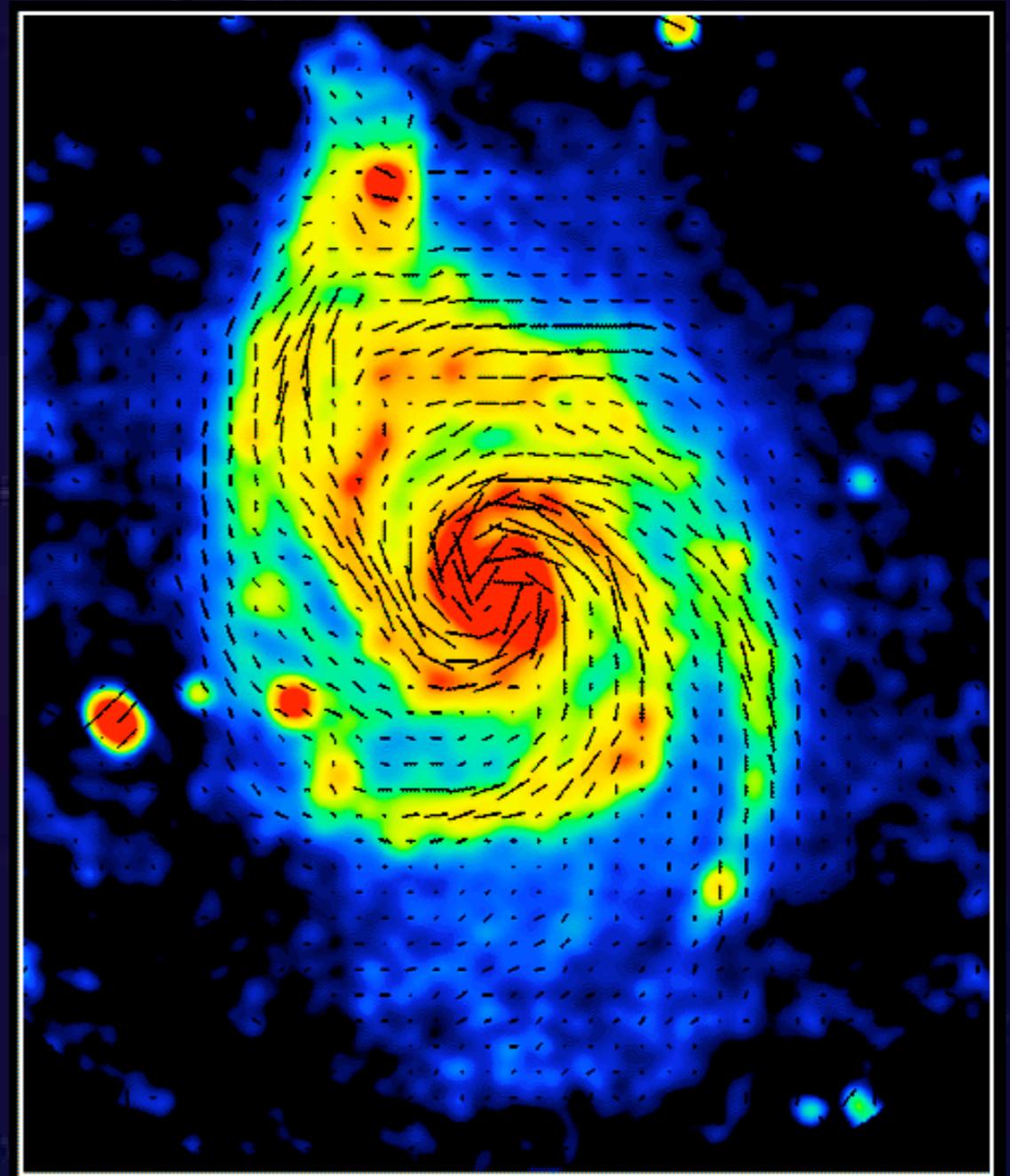
24 Jul 1987

29 Jul 1988

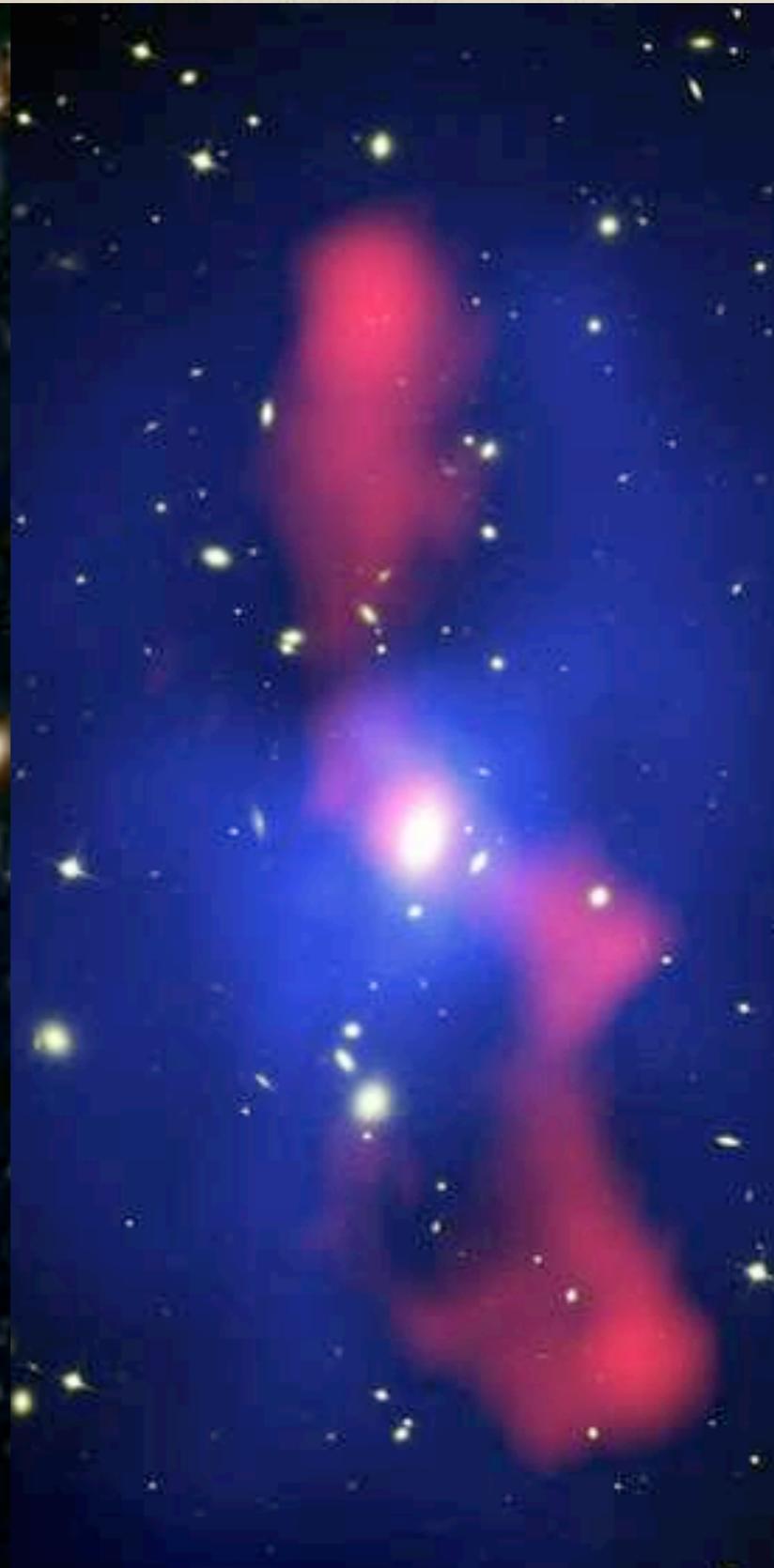
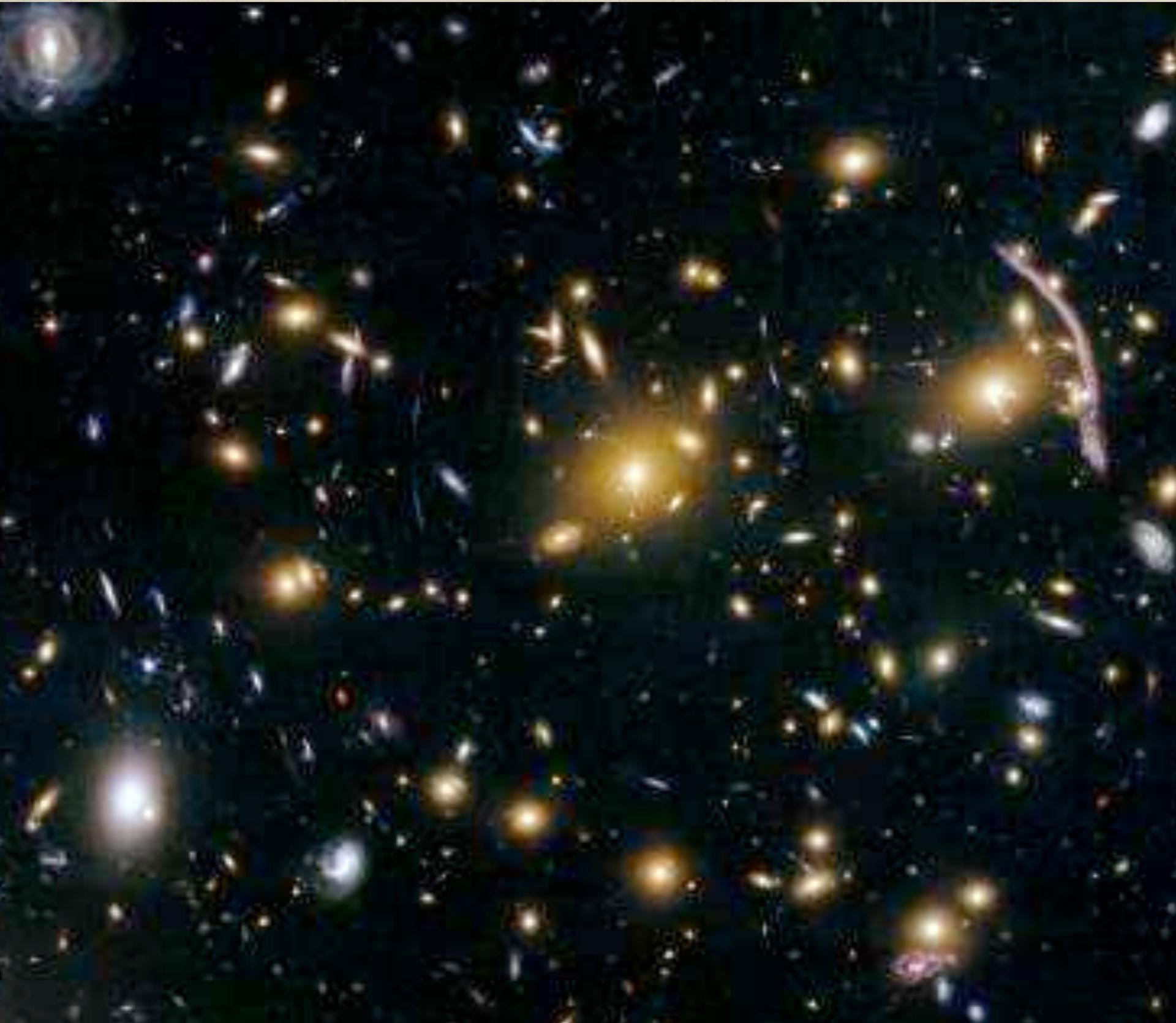
18 Aug 1989



L'Univers magnétique : la Galaxie



L'Univers magnétique : les amas



Problématique générale

- *La dynamique magnétique dans l'Univers est décrite par des équations aux dérivées partielles :*
 - *en 4 dimensions: 3D spatiales + dynamique temporelle*
 - *fortement non-linéaires*
- *Conséquences pratiques*
 - *problèmes mathématiquement très difficiles*
 - *très grande richesse de phénomènes*
 - *fortes séparations d'échelles*
- *La simulation est devenue indispensable pour guider la théorie*
 - *mise en évidence de phénomènes non-linéaires complexes*
 - *études paramétriques*

Philosophies de la modélisation

- *Philosophie Terminator*

- *faire la plus grosse simulation possible, avec le plus de contenu physique possible, le tout avec le plus de résolution numérique possible*

- *Philosophie Sherlock Holmes*

- *comprendre l'essence de certains phénomènes physiques non-linéaires en utilisant un modèle numérique minimaliste contenant des éléments de physique bien choisis*

- *Les deux approches ont des avantages et des inconvénients*

- *Les deux sont nécessaires pour faire des progrès sur la physique qui nous intéresse*

L'approche terminator

- *Simulation directe sur des machines massivement parallèles*
 - *Bluegene, IBM SP, SGI Altix, Bull, NEC SX etc.*
- *Les +*
 - *calculs en 3D à haute résolution pour tendre vers des régimes asymptotiques pertinents pour l'astro*
 - *produit des résultats spectaculaires et “vendeurs”*
- *Les -*
 - *nécessite des infrastructures lourdes et des efforts constants de développement/portage pour devenir et rester compétitif*
 - *l'analyse des résultats se limite souvent à “on voit que...”*
 - *pas si asymptotique que ca...*

L'approche Sherlock Holmes

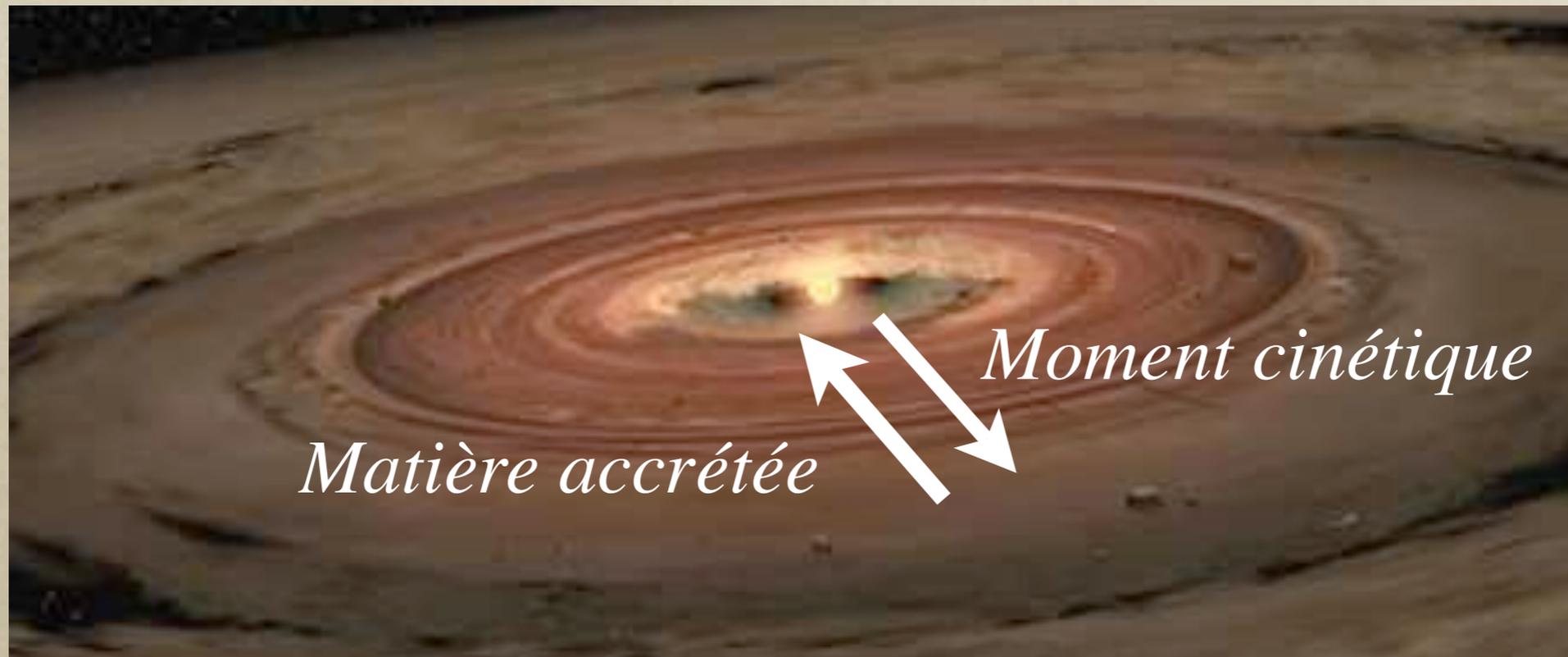
- *Modélisation de phénomènes ciblés, à résolution modérée*
 - *utilisation possible d'ordinateurs personnels, clusters ou mésocentres*
- *Les +*
 - *une démarche simplifiée qui laisse la porte ouverte à l'interprétation physique et à l'analyse théorique*
 - *études paramétriques extensives possibles*
- *Les -*
 - *ne prend pas en compte toute la complexité astrophysique*
 - *nécessite des techniques numériques d'analyse assez "sioux", pouvant être difficiles à mettre en oeuvre*

Stratégies de développement

- *L'approche terminator demande aujourd'hui de gros moyens et nécessite de plus en plus des collaborations à grande échelle (e.g. Flash, Horizon, ASH)*
- *Que faire sans équipe d'ingénieurs en calcul scientifique ?*
 - *Attaquer les problèmes sous un angle différent de la concurrence (essayer d'être créatif)*
 - *Développer des collaborations avec des collègues dans la même situation, et possédant des expertises complémentaires*
 - *Se former à différentes techniques numériques (essentiel)*
 - *Algorithmes, parallélisation, implémentation pratique*
 - *Utiliser des outils et bibliothèques numériques performants et "user-friendly", dans le domaine public si possible (pérennité des codes)*

Illustration par l'exemple

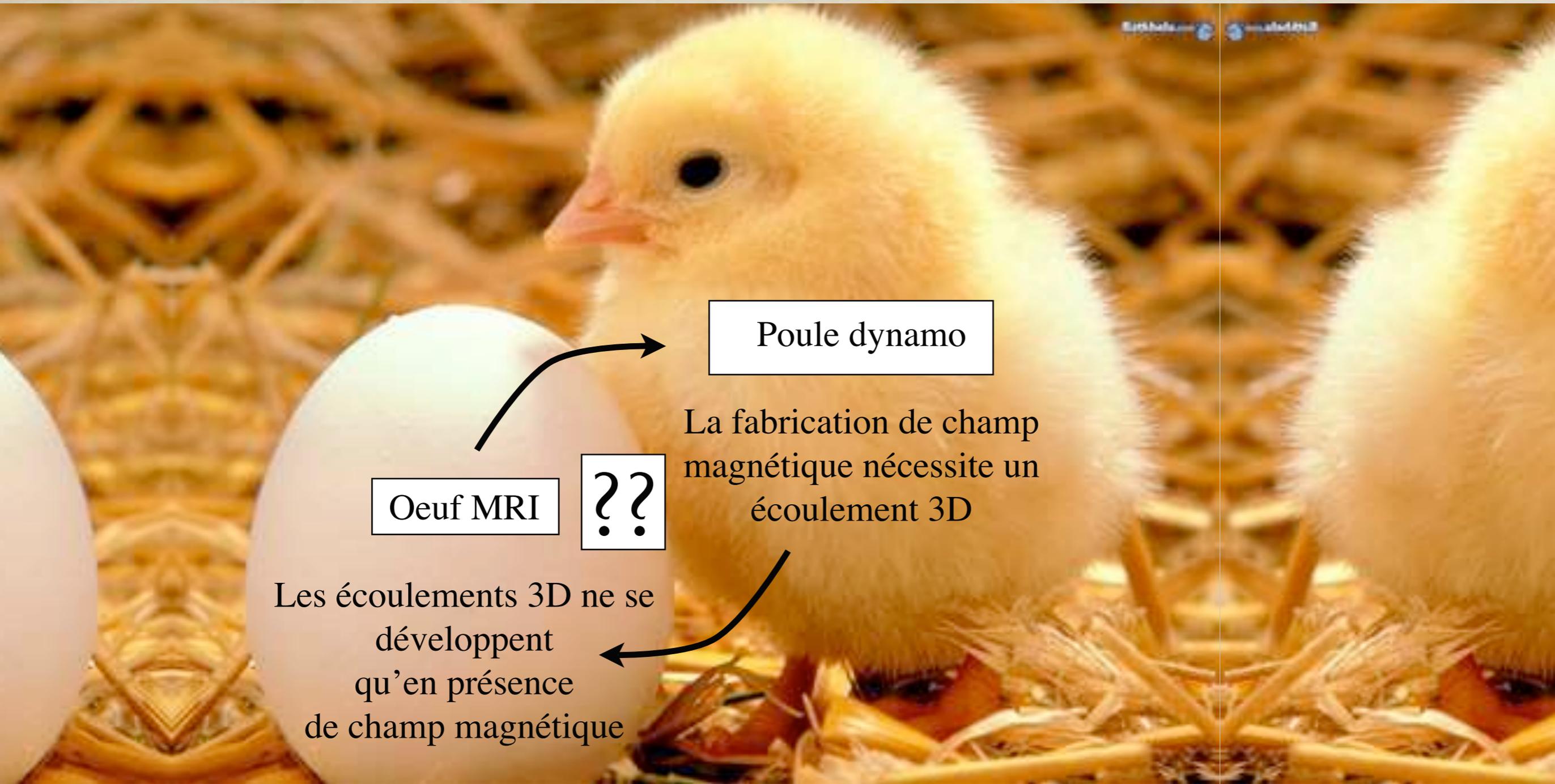
- *Turbulence et effet dynamo dans les disques d'accrétion*
 - *L'accrétion nécessite un transport radial de moment cinétique vers l'extérieur*



- *Le mécanisme favorisé est un transport par la turbulence au sein du disque*
- *Mais...le développement de cette turbulence repose sur la présence de champ magnétique...dont le développement repose sur l'existence de turbulence !*



Une dynamo “poule et oeuf” ?



Poule dynamo

Oeuf MRI

??

La fabrication de champ magnétique nécessite un écoulement 3D

Les écoulements 3D ne se développent qu'en présence de champ magnétique

Démarche suivie

- *Approche de type Sherlock Holmes*
 - *quels sont les mécanismes fondamentaux nécessaires à la génération conjointe de turbulence ET de champ magnétique dans ce système ?*
- *Analogie forte entre ce problème et la transition turbulente dans un tuyau ou une couche limite hydrodynamique*
 - *rôle connu de cycles de régénération dans le problème hydro*
- *Objectif poursuivi*
 - *identifier et étudier le rôle dans le développement de la turbulence de solutions non-linéaires cycliques de dynamo MRI en 3D dimensions*
- *Code à développer*
 - *un solver de Newton-Krylov permettant de calculer de telles solutions*

Notre petite collaboration

- *Geoffroy Lesur, IPAG, disposait d'outils performants et bien testés de simulation numérique directe de turbulence MHD en écoulement Keplerien*
 - *Utilisation d'un code MHD "astro" robuste existant*
- *Carlo Cossu, LadHyX/IMFT, a fourni une implémentation concrète de la méthode de Newton pour des cycles de systèmes dynamiques à faible nombre de degrés de liberté*
 - *Utilisation d'une expertise algorithmique absente en astro*
- *François Rincon, IRAP, a construit avec l'aide des deux autres un solveur Newton-Krylov pour la MHD en 3D*

Problématiques du développement

- *Difficultés techniques majeures*
 - *implémenter une méthode de Newton pour un problème multi-dimensionnel avec beaucoup de degrés de liberté*
 - *l'interfacer avec un code de simulation MHD parallèle*
- *Beaucoup d'algèbre numérique lourde*
 - *systèmes linéaires denses pouvant aller jusqu'à plusieurs dizaines de milliers d'inconnues*
 - *trouver des algos adaptés: méthodes de Krylov*
- *Trouver sur le marché de l'open source des implémentations performantes et flexibles de ces algos, incorporables dans notre code en un temps raisonnable*
 - *la solution existe : PETSc*

Les outils utilisés

□ *Langages*

- *fortran pour le développement préliminaire (familier de tous)*
- *passage au C pour le code complet, plus confortable pour interfacer les différentes bouts de code et lier ceux-ci à des bibliothèques scientifiques*

□ *Bibliothèques scientifiques principales*

- *FFTW pour les FFTs spatiales des champs MHD*
- *PETSc, SLEPc pour le solveur Newton et l'algèbre (basés sur LAPACK/BLAS)*

□ *Outils Unix* git, automake, autoconf

□ *Visualisation, post-traitement :*

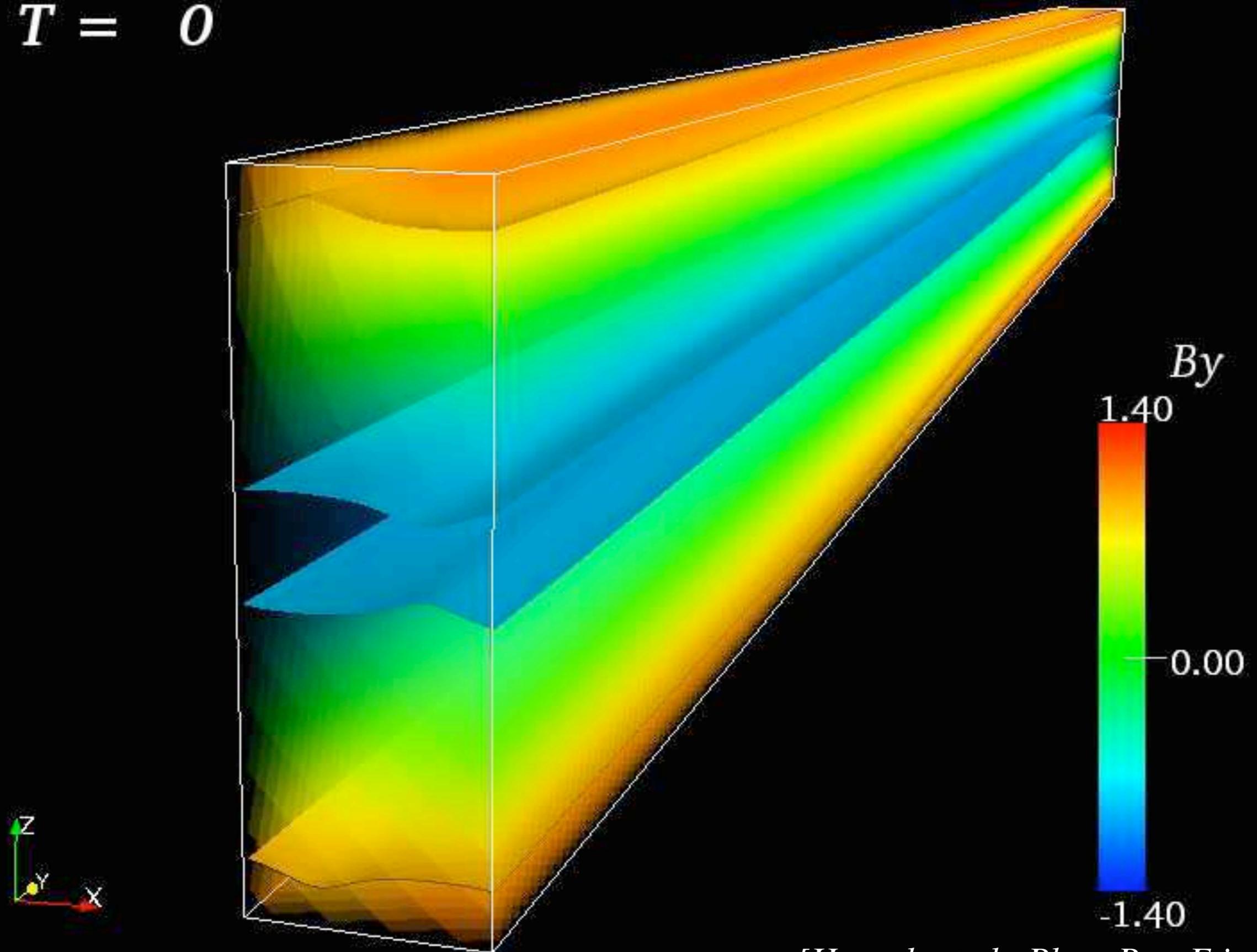
- *Paraview (VTK),*
- *python: numpy, matplotlib, mayavi*

Déroulement du projet

- 2005-2007: *méthode de Newton en Fortran pour un écoulement de Couette MHD*, calcul de solutions stationnaires
- 2007-2009 : *développement d'un code performant et flexible en C pour le calcul des solutions dépendantes du temps*
 - *réunions de travail tous les 6 mois environ, gros travail à 3 pour interfacer et adapter les différentes méthodes et algos*
- *Les résultats à ce jour*
 - *exploitation scientifique: 1 article publié, 3 en préparation*
 - *code performant, unique dans la communauté astro*
 - *code "user-friendly", déjà utilisé par deux étudiants de M2*
 - *code relativement flexible : projets d'utilisation en aérodynamique, hors astro*

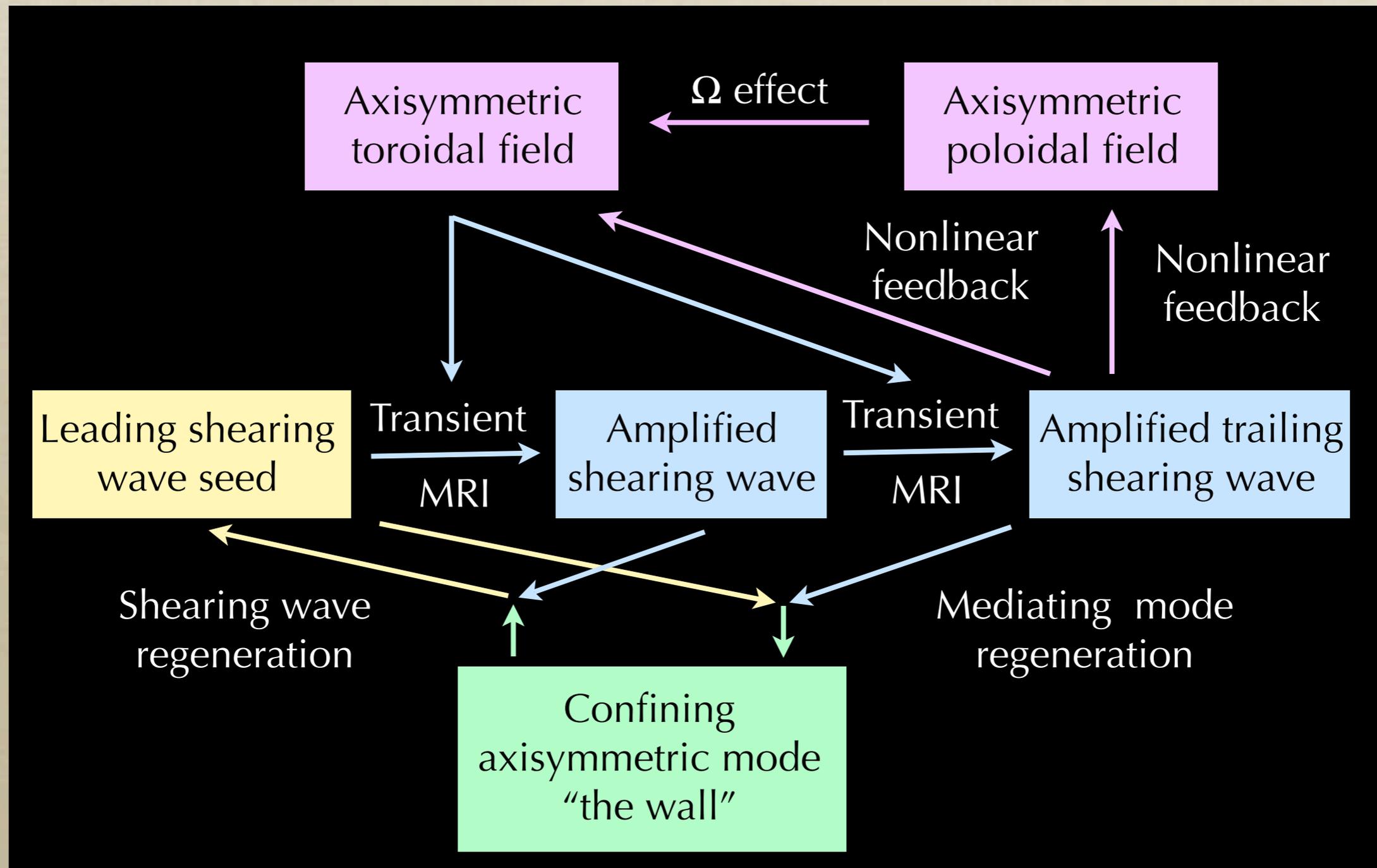
Un exemple de cycle de dynamo MRI...

$T = 0$



[Herault et al., Phys. Rev. E in press]

...et le mécanisme physique sous-jacent



Merci pour votre attention