



Computati**O**nal **AST**rophysics

COAST

Projet démarre en 2007

Regroupe les numériciens du SAp et l'équipe de visualisation du SEDI
Depuis 2012 comprend aussi la MdS

Environ 65 membres et anciens membres (environ 19 permanents)

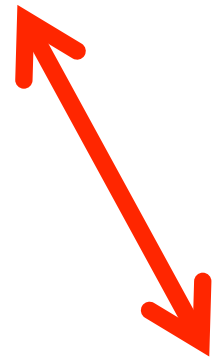
Au moins 7 anciens étudiants ont à présent un poste en recherche
+de nombreux postdocs

Moyens de calcul :

- environ 30-50 millions d'heures par an au niveau national, et 30 millions au niveau européen (allocations PRACE)
- importance des moyens locaux (calcul, stockage, visualisation)



Modern Astrophysics



$$\omega^4 - (\Omega^2 + 2k^2 v_A^2)\omega^2 + k^2 v_A^2 (k^2 v_A^2 - 3\Omega^2) = 0.$$

$$\frac{dN}{dM} \propto \frac{1}{R^6} \left(\frac{M}{R^3} \right)^{-\frac{3}{2} - \frac{1}{2\sigma^2} \ln(M/R^3)}, \quad M = R(1 + \mathcal{M}_*^2 R^{2\eta}), \quad \mathcal{M}_* \propto \frac{V_0}{C_s} \frac{\lambda_J}{1 \text{ pc}}$$

-comprendre la physique et tester différentes hypothèses
(*rôle historique de l'astrophysique quant à l'exploration de la physique*)

-interpréter des observations hautement dégénérées


-recréer une séquence évolutive de systèmes évoluant trop lentement

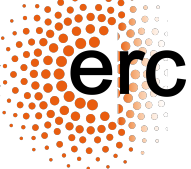
-prédictions des futures observations

=> *accès au temps de télescopes*

Enjeux scientifiques de la simulation numérique en astrophysique

- cosmologie : 1 équipes
- galaxies : 2 équipes
- étoiles : 2 équipes
- disques/planètes : 1 équipe

4 ×  : centrés sur les simulations


4 ×  : incluant un WP simulations

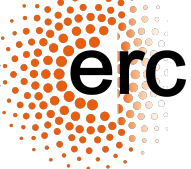
Enjeux méthodologiques

- une chaîne de métiers : un écosystème numérique
- une base de données de simulations
- un défi majeur et imminent

Enjeux scientifiques de la simulation numérique en astrophysique

- cosmologie : 1 équipes
- galaxies : 2 équipes
- étoiles : 2 équipes
- disques/planètes : 1 équipe

4 ×  : centrés sur les simulations

4 ×  : incluant un WP simulations

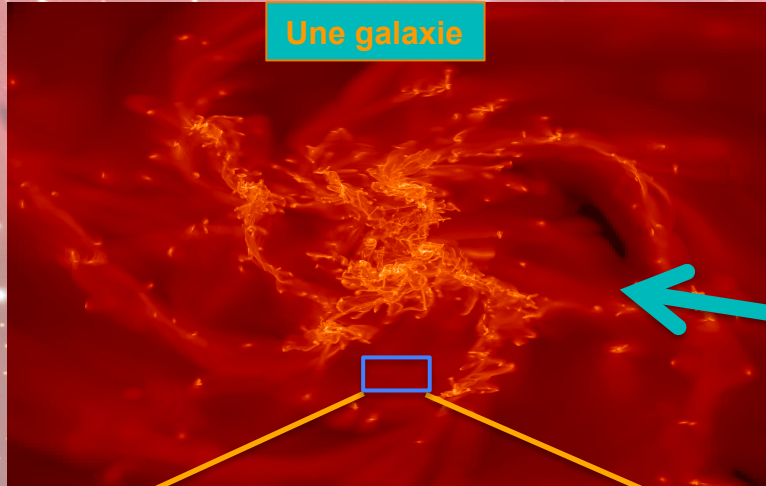
Enjeux méthodologiques

- une chaîne de métiers : un écosystème numérique
- une base de données de simulations
- un défi majeur et imminent

Ces calculs ont nécessité plusieurs millions d'heures de calcul et ont été effectués sur quelques centaines à quelques milliers de processeurs sur les grands calculateurs nationaux et européens.

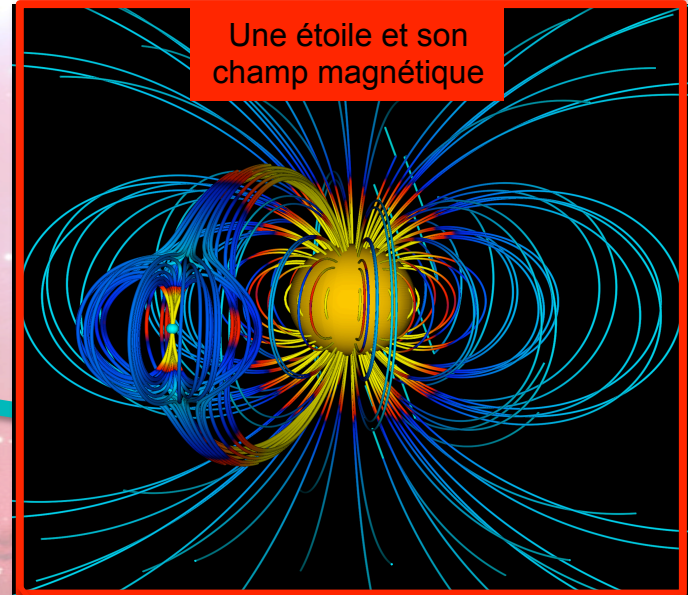
Une vaste collaboration IRFU (SAP&SEDI) et Maison de la Simulation

Une galaxie

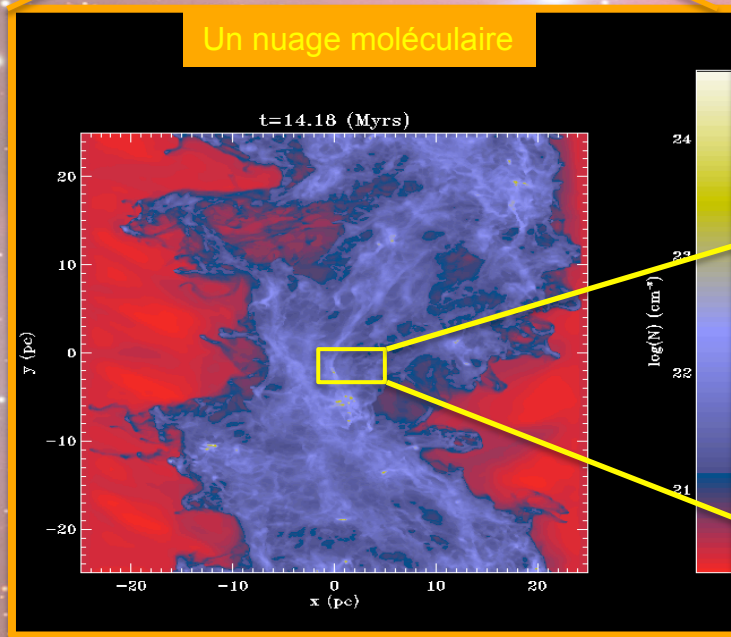


Feedback Stellaire

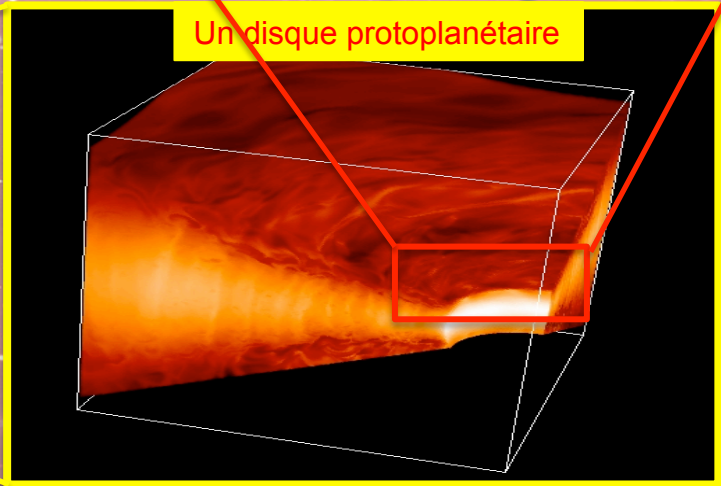
Une étoile et son champ magnétique



Un nuage moléculaire



Un disque protoplanétaire

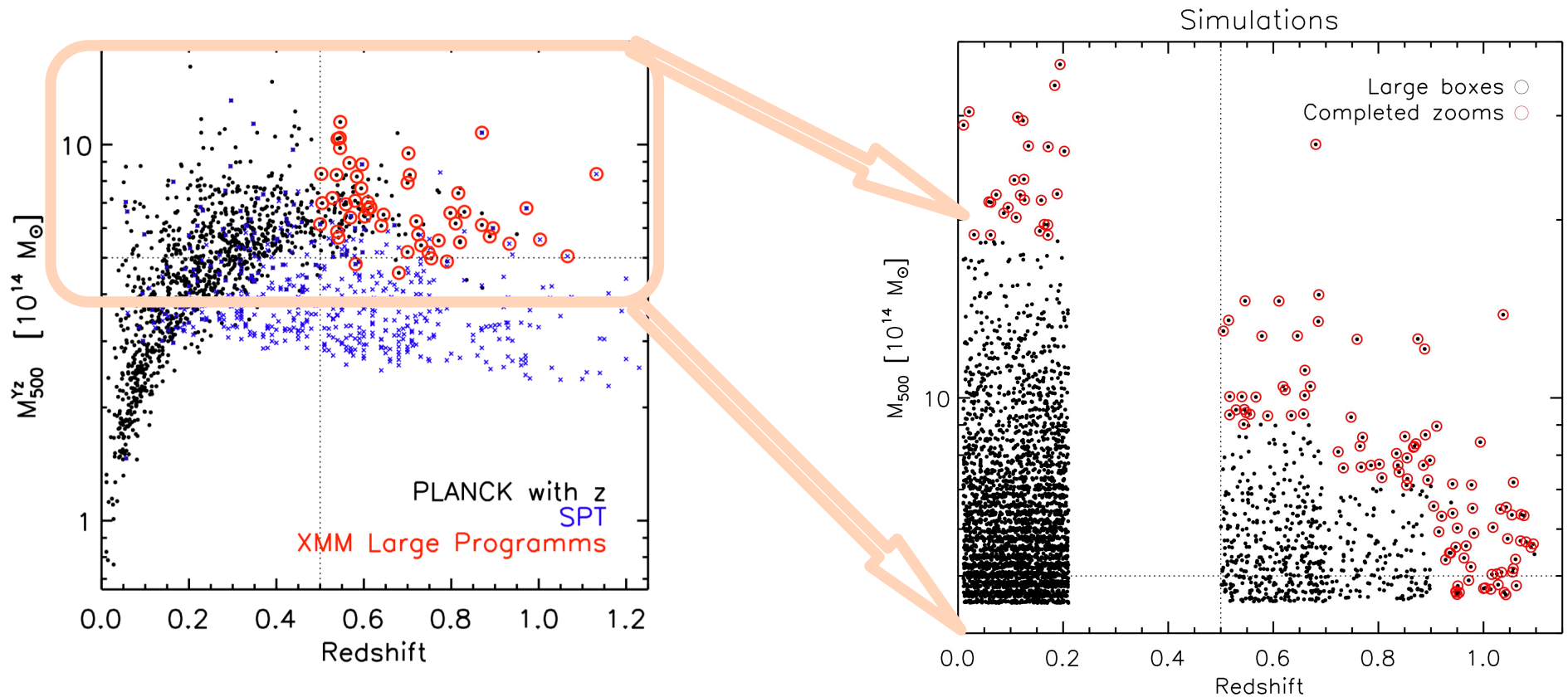




Modern Astrophysics

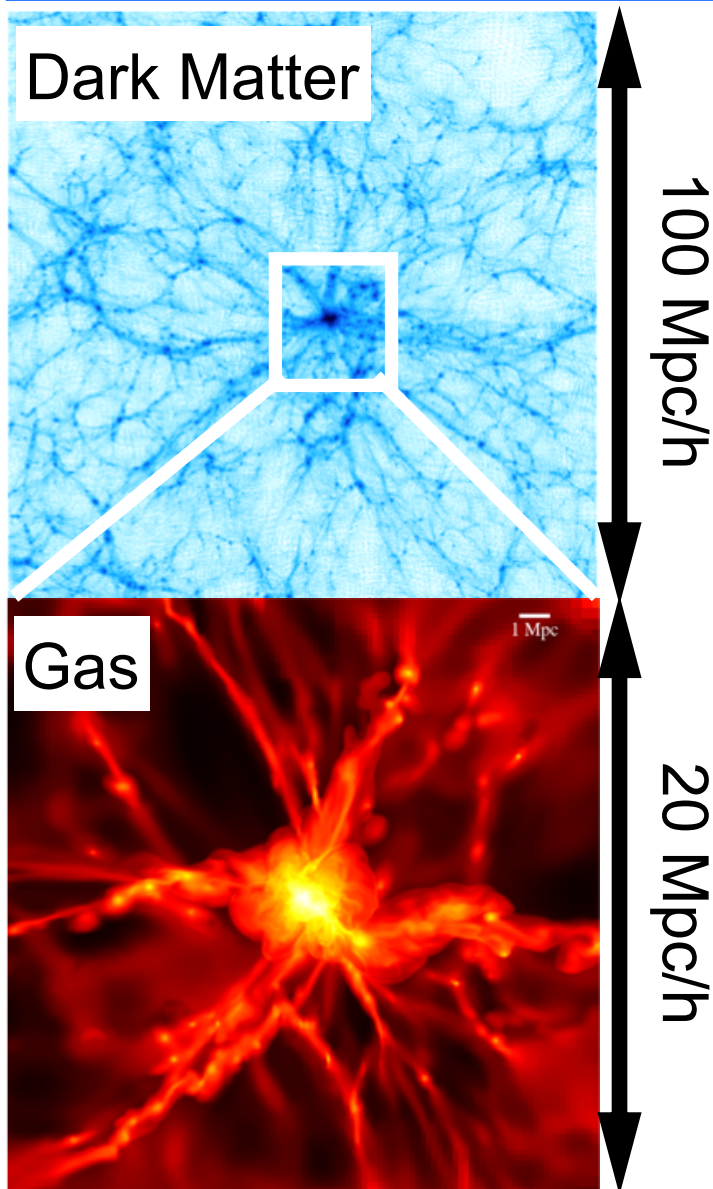
$$\omega^4 - (\Omega^2 + 2k^2 v_A^2)\omega^2 + k^2 v_A^2 (k^2 v_A^2 - 3\Omega^2) = 0.$$

Evolution of cluster dark matter profiles as a test of Λ CDM



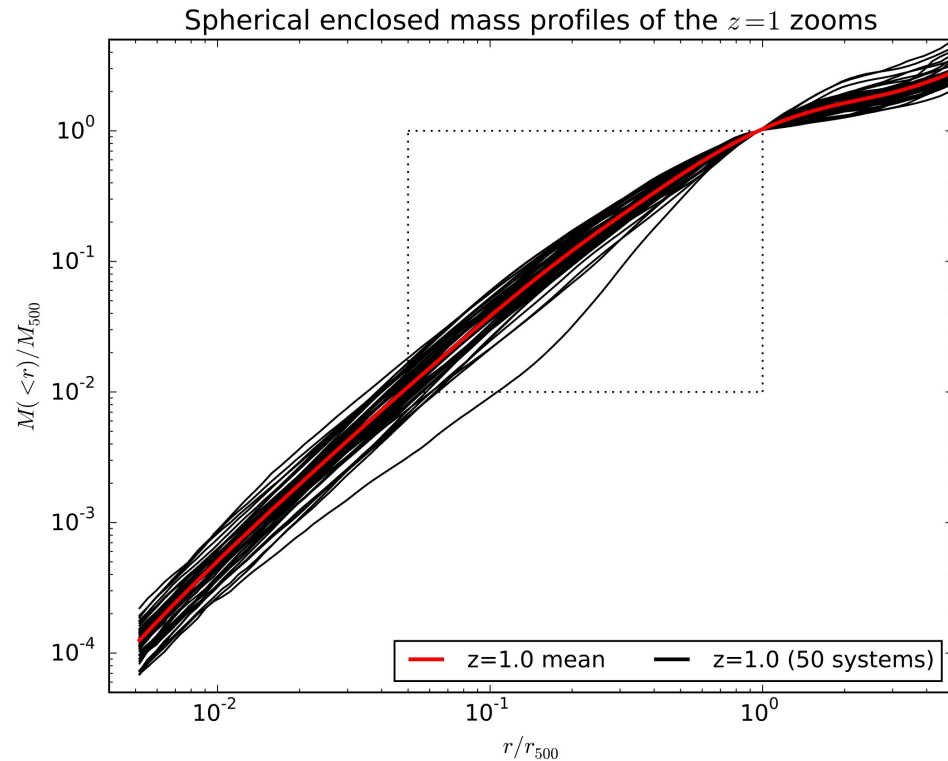
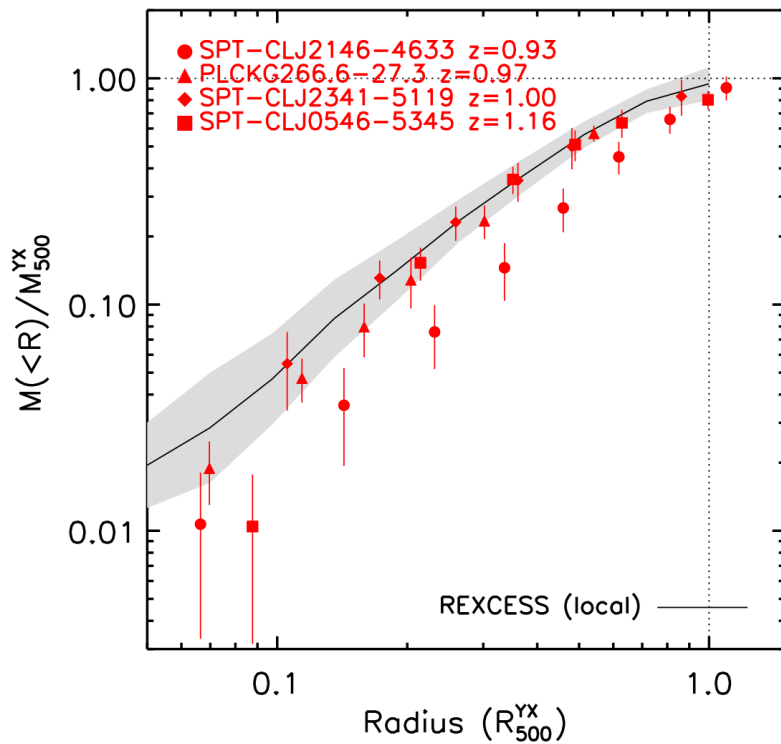
- **Goal: test Λ CDM** using the evolution of the **DM profiles** of the **most massive clusters** in the Universe
- **Compare XMM observations** of Planck detected clusters with **simulations**
- Simulate 50-100 clusters with $M_{500} \geq 4.5 \times 10^{14} M_{\odot}$ in several redshift bins up to redshift 1 with a high-spatial resolution (a few kpc)

Evolution of cluster dark matter profiles as a test of Λ CDM



- In practice: (i) **doing three large (1 Gpc/h on a side with 2048^3 DM particles) DM only simulations** and (ii) **zooming at high resolution (a few kpc) on 50-100 galaxy clusters in each of the redshift bins** which will progressively include the relevant galaxy formation physics.
- All the simulations are done with the AMR code RAMSES (Teyssier 2002) on the OCCIGEN supercomputer at CINES in Montpellier using a **large GENCI computing time-allocation** (>11 million CPU hours already allocated over 2015-2016; PI Le Brun)

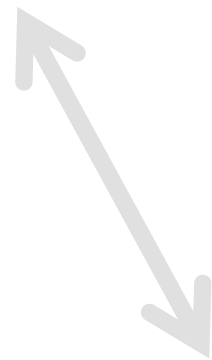
Evolution of cluster dark matter profiles as a test of Λ CDM



- Masses slightly lower in the observations ($\sim 3-9 \times 10^{14} M_{\odot}$) instead of $\geq 4.5 \times 10^{14} M_{\odot}$
- Observational mass profiles computed assuming hydrostatic equilibrium and X-ray spectroscopy whereas the simulations do not yet have gas
- ➔ Need synthetic observations of more realistic simulations (In progress)



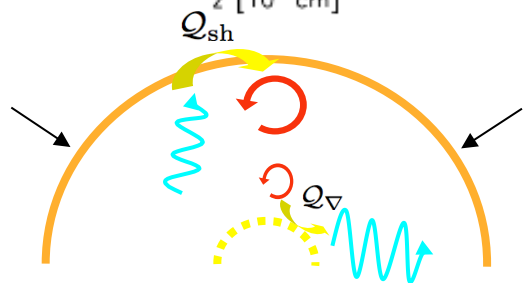
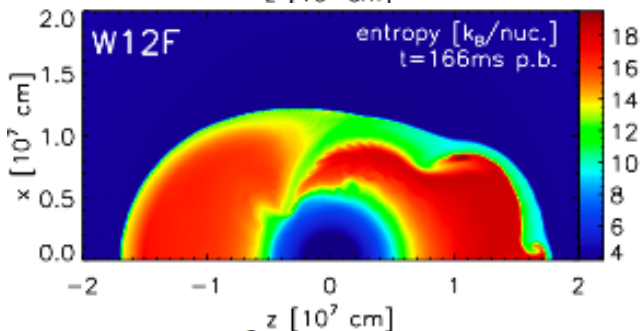
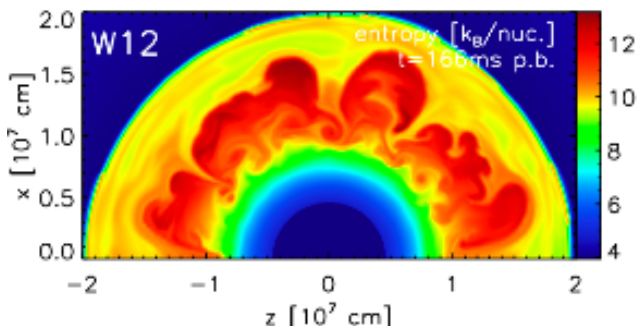
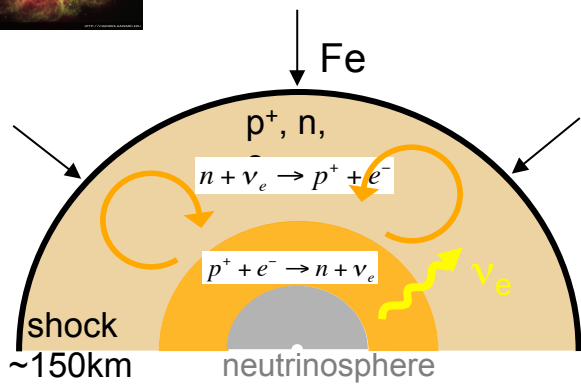
Modern Astrophysics



$$\omega^4 - (\Omega^2 + 2k^2 v_A^2) \omega^2 + k^2 v_A^2 (k^2 v_A^2 - 3\Omega^2) = 0.$$

$$\frac{dN}{dM} \propto \frac{1}{R^6} \left(\frac{M}{R^3} \right)^{-\frac{3}{2} - \frac{1}{2\sigma^2} \ln(M/R^3)}, \quad M = R(1 + \mathcal{M}_*^2 R^{2\eta}), \quad \mathcal{M}_* \propto \frac{V_0}{C_s} \frac{\lambda_J}{1 \text{ pc}}$$

Instabilités hydrodynamique du cœur d'une étoile en effondrement



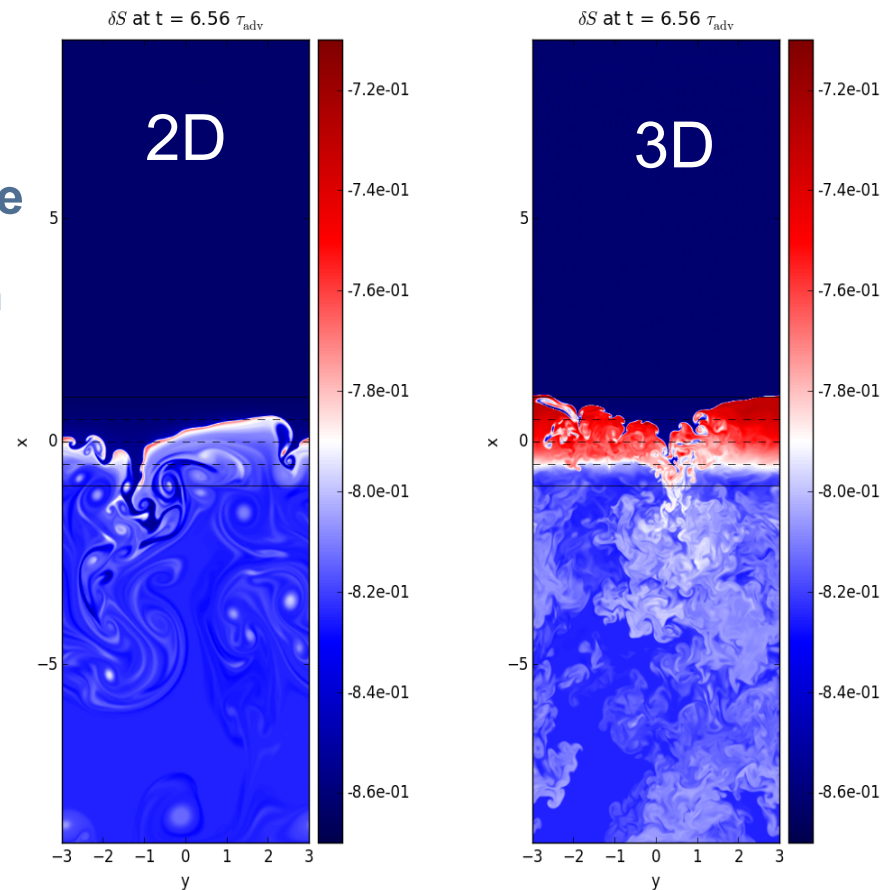
Instabilité convective

- absorption de neutrinos
- stabilisation par l'advection

2D vs 3D

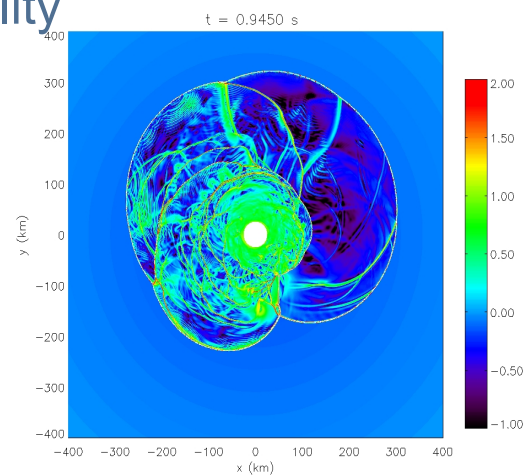
(Foglizzo+06, Kazeroni+16)

$$\chi \equiv \int_{\text{sh}}^{\text{gain}} \omega_{\text{BV}} \frac{dr}{v_r} < 3$$



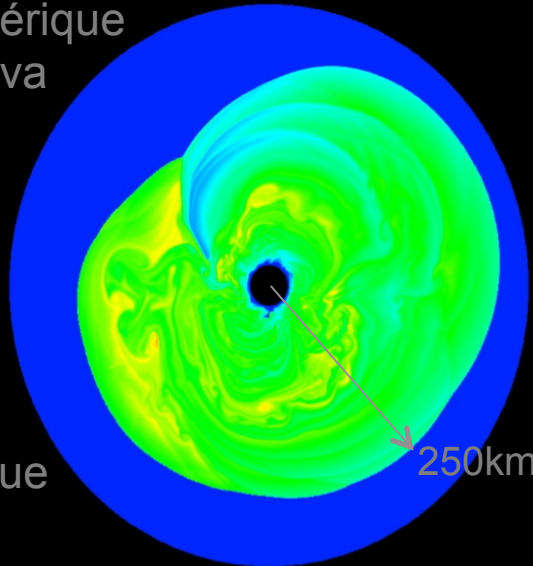
SASI: Standing Accretion Shock Instability

- cycle advectif-acoustique (Foglizzo 02, Bondin+03)
- kick & spin de l'étoile à neutrons (Kazeroni+16)
- analogue experimental (Foglizzo+12, +15)



Approche numérique, analytique et analogique de l'explosion asymétrique des supernovae

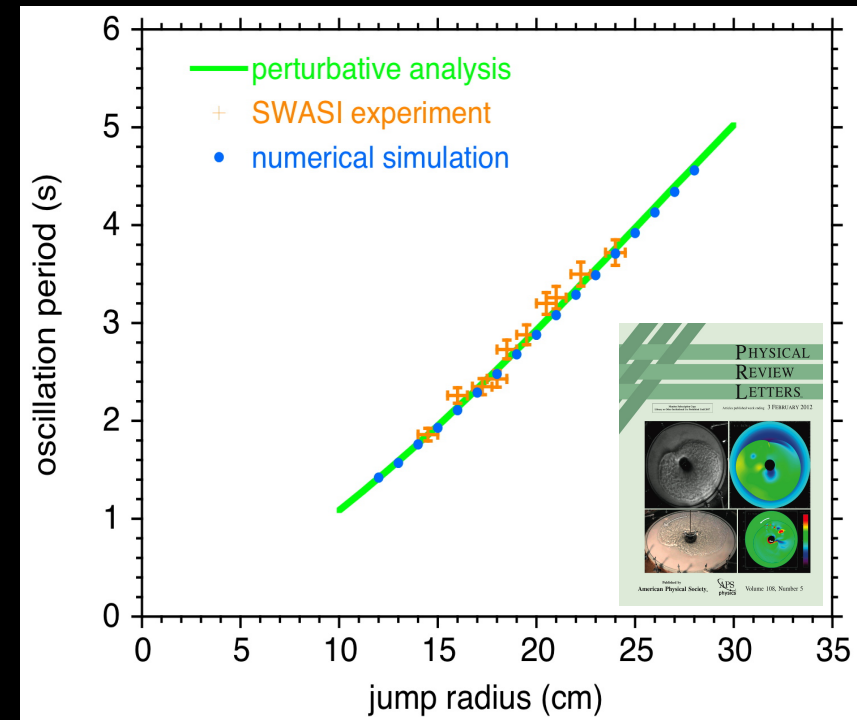
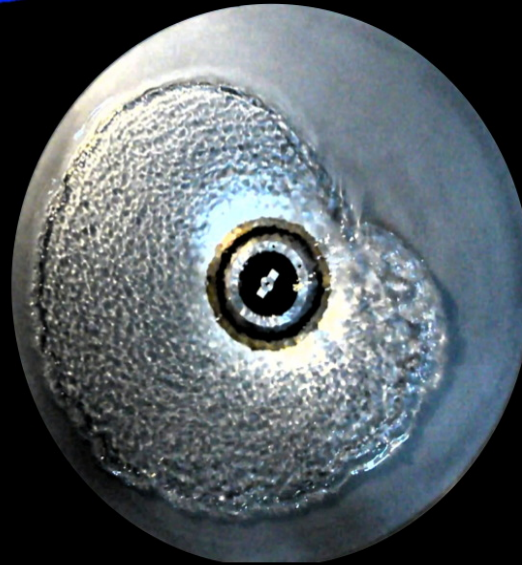
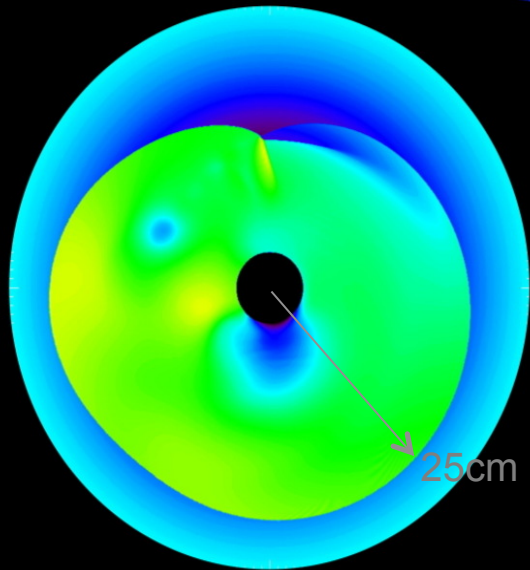
simulation numérique de supernova



- seuil d'explosion des supernovae
- kick des étoiles à neutrons
- spin des pulsars

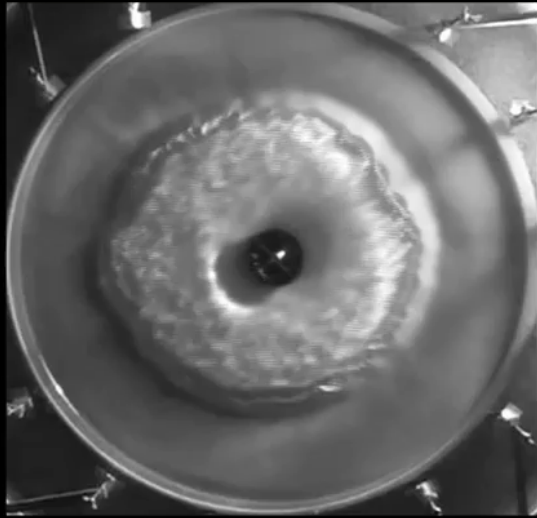


simulation numérique de fontaine

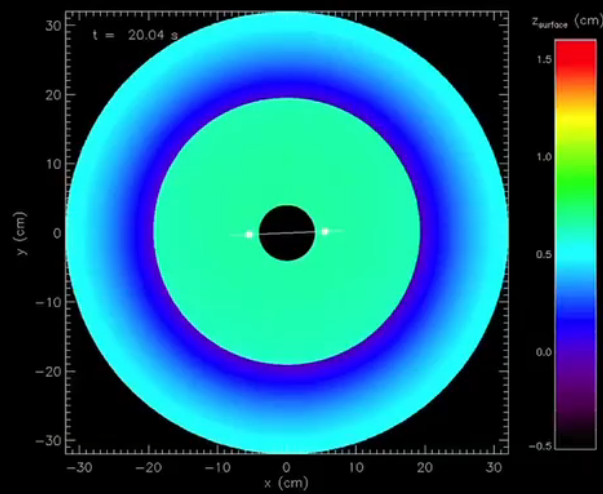


Approche analogique de l'explosion asymétrique des supernovae

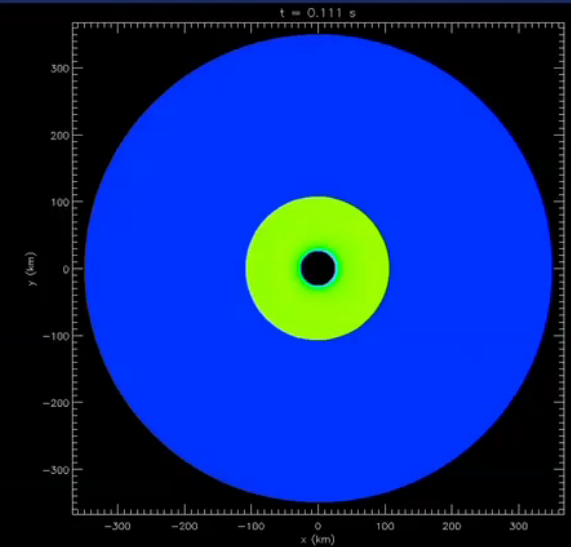
Foglizzo, Kazeroni, Gonzalez, Masset, Durand



Expérience hydraulique



Simulation numérique de l'expérience hydraulique



Simulation numérique de l'onde de choc dans le coeur de la supernova

Enjeux scientifiques de la simulation numérique en astrophysique

- cosmologie : 1 équipes
- galaxies : 2 équipes
- étoiles : 2 équipes
- disques/planètes : 1 équipe

4 × erc : centrés sur les simulations

4 × erc : incluant un WP simulations

Enjeux méthodologiques

- une chaîne de métiers : un écosystème numérique
- une base de données de simulations
- un défi majeur et imminent



Modern Astrophysics

$$\omega^4 - (\Omega^2 + 2k^2 v_A^2)\omega^2 + k^2 v_A^2 (k^2 v_A^2 - 3\Omega^2) = 0.$$

Etape 1 : discrétisation et résolution des équations (mathématiques appliquées)

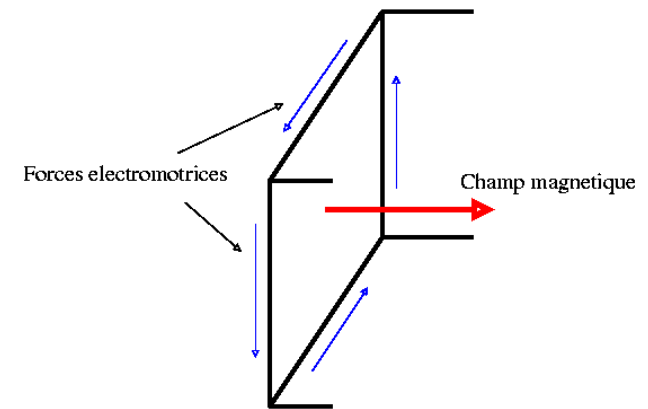
Godunov method:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} = 0 \Rightarrow \frac{U^{n+1} - U^n}{\Delta t} + \frac{F_{i+1/2}^{n+1/2} - F_{i-1/2}^{n+1/2}}{\Delta x} = 0$$

Exact conservation: mass, momentum, energy

Constrained transport: insure nullity of divB

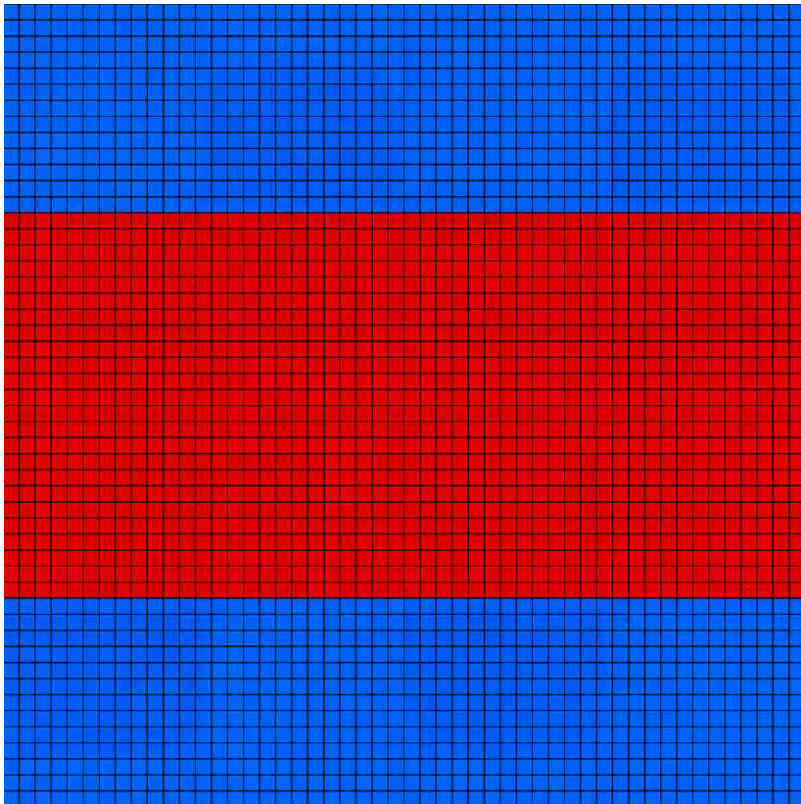
$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (v \times B) \Rightarrow \iint_S B \cdot dS = \oint (v \times B) \cdot dl$$



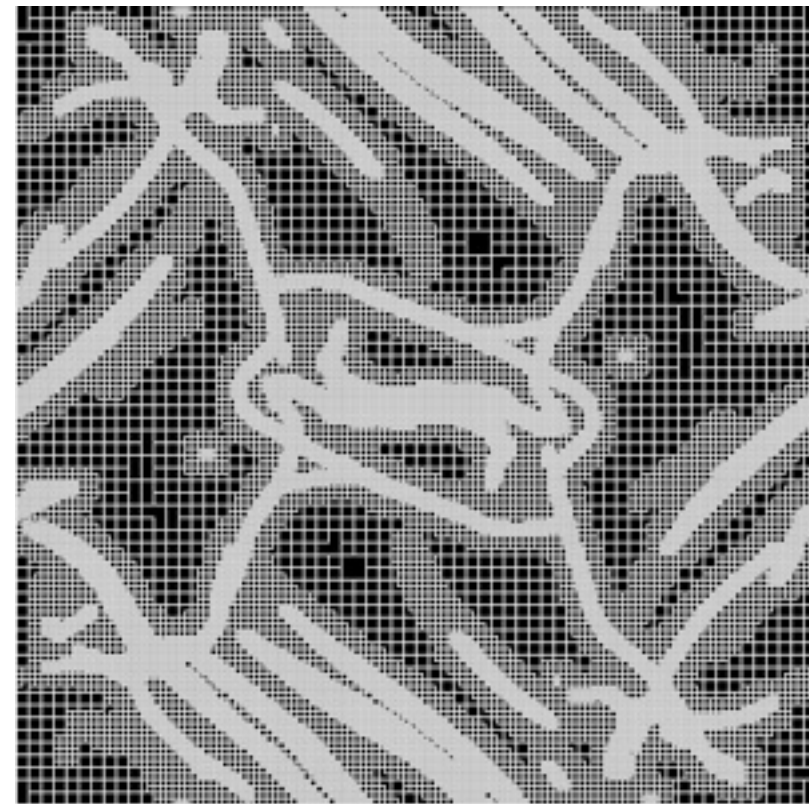
Etape 2 : le maillage (math appliquée / algorithmique)

Le maillage traduit la discrétisation en espace. Un maillage peut être très bien ou pas du tout adapté à un problème donné.

La gestion du maillage est souvent très complexe (maillage adaptatif, maillage glissant...). Cela devient de plus en plus un métier en soi.



Maillage glissant
(code AREPO)



Maillage adaptatif
(code RAMSES)

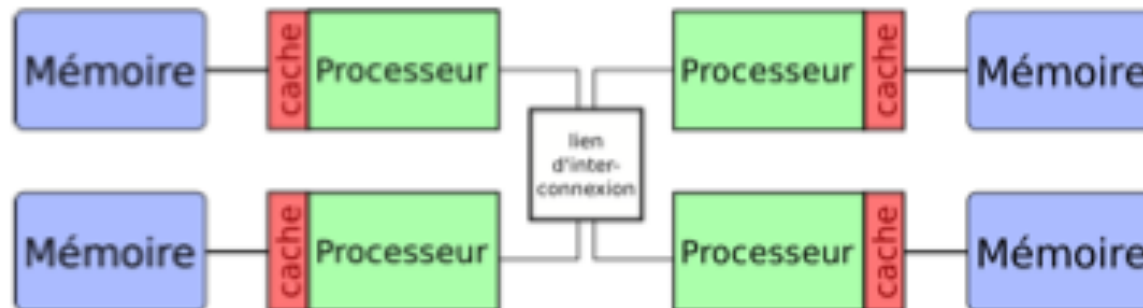
Etape 3: Parallélisme (génie logiciel)

La plupart des calculs se font sur qqes 100-1000 cœurs (certains gros calculs se font sur 1,000,000 de cœurs).

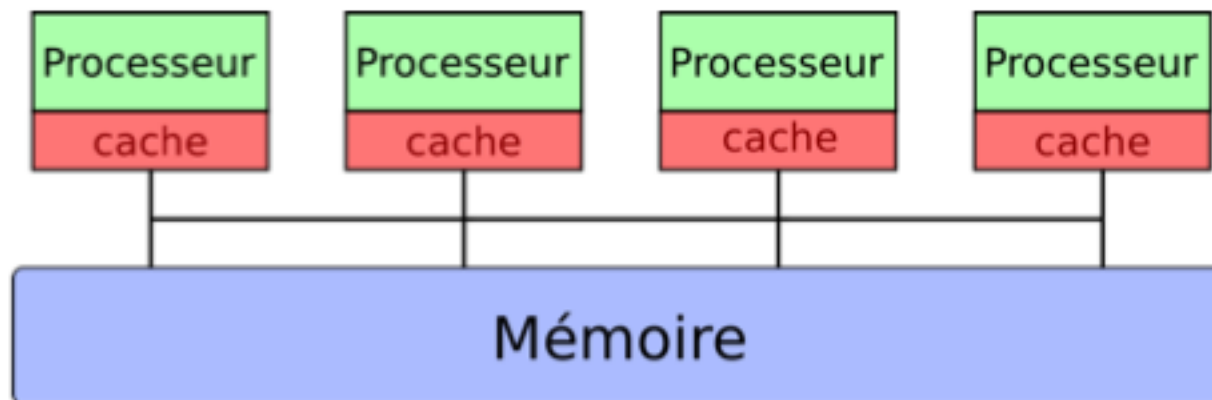
Le calcul est distribué et les cœurs échangent de l'information régulièrement.

Une parallélisation mal faite peut conduire à une perte d'efficacité chronique.

Il s'agit d'un travail de type ingénierie logicielle de haute volée.



mémoire distribuée



mémoire partagée

Codes calculs développés dans le cadre de COAST :

-RAMSES : maillage adaptatif, volume fini, MHD, autogravité

-HERACLES : maillage fixe, volume fini, transfert radiatif M1



-FARGO : maillage cylindrique, adapté aux problèmes en rotation

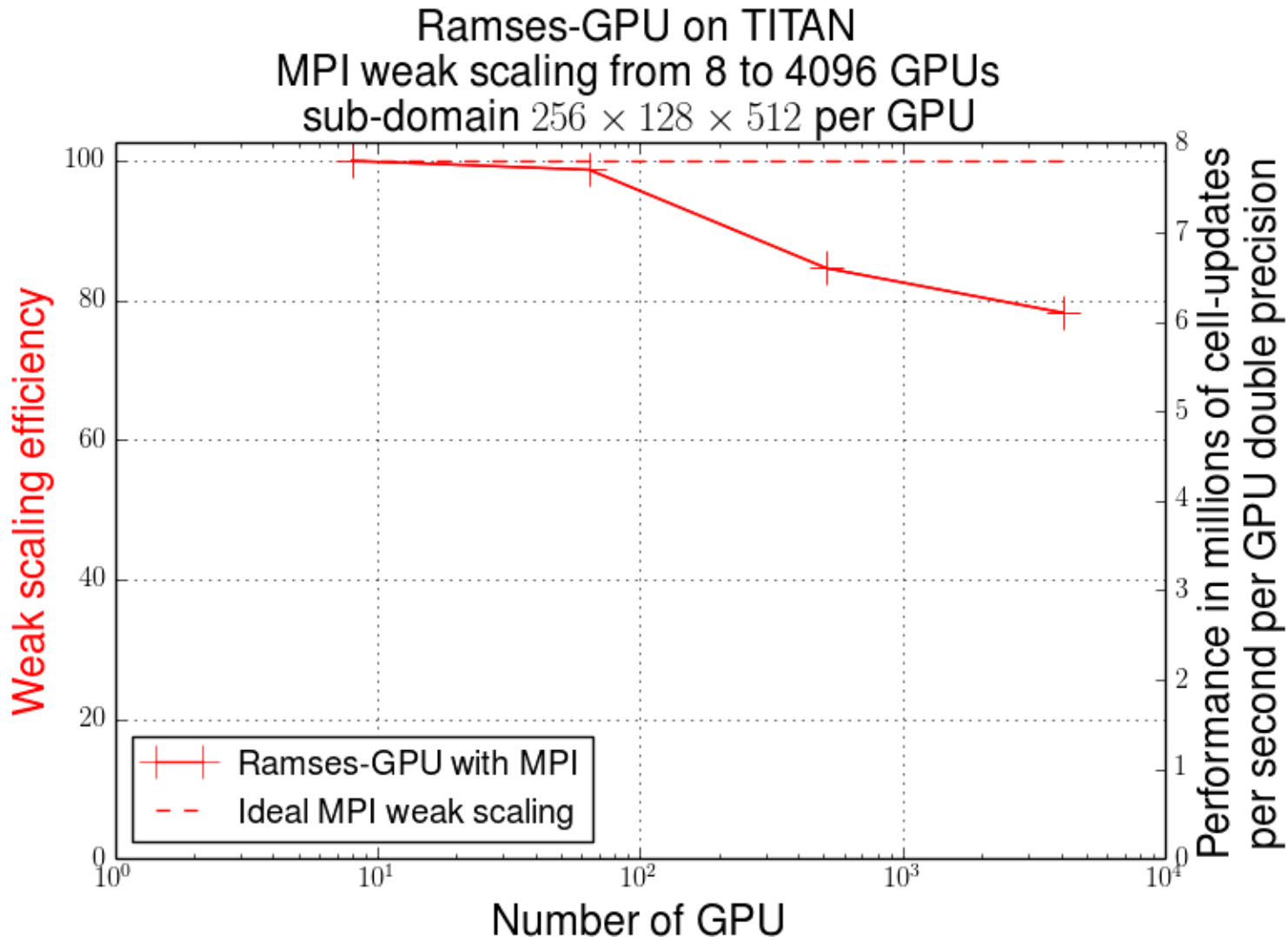
-ASH : anélastique, approche polynomiale, MHD

Codes analyses/visualisation développés dans le cadre de COAST :

-Sdvision (code de visualisation IDL)

-PYMSES (package python pour RAMSES)

Version cartésienne de RAMSES portée sur GPU par Pierre Kestener (MdS)



A permis à une équipe américaine
(pas de grosse machine GPU
disponible en France) de faire les
plus grosses simulations de
turbulence MRI du monde :
(N_x, N_y, N_z)=(768, 1024, 3072)

BlueWaters 576 GPU (4000 GPU)
220,000 h

2 proposals déposés sur TITAN
pour faire de la turbulence MHD
fortement compressible



Etapes 4 : visualisation, exploitation, dissémination

=>Rôle majeur joué par le SEDI

The screenshot shows the CoastDB website interface. At the top, there is a navigation bar with 'Home', 'Topics', and 'About'. A dropdown menu for 'Topics' is open, listing 'Solar Magnetohydrodynamics', 'Star-planet interactions', 'Star formation', 'Galaxy formation', and 'Galactic mergers'. Below the navigation is a large banner image of a molecular cloud simulation with the text 'CoastDB' overlaid. The main content area is titled 'The Coast simulation database' and contains three paragraphs of text describing the database's purpose and goals. Below the text are three tables, each representing a different category of simulation projects.

Solar Magnetohydrodynamics

PROJECT	DESCRIPTION
Solar flare project	This project aims at describing self-consistently the formation of solar flares.

Star formation

PROJECT	DESCRIPTION
Colliding flow simulations	This project aims at describing self-consistently the formation of molecular clouds starting from the very diffuse atomic interstellar medium.
FRIG	From galactic scales to cores

Galactic mergers

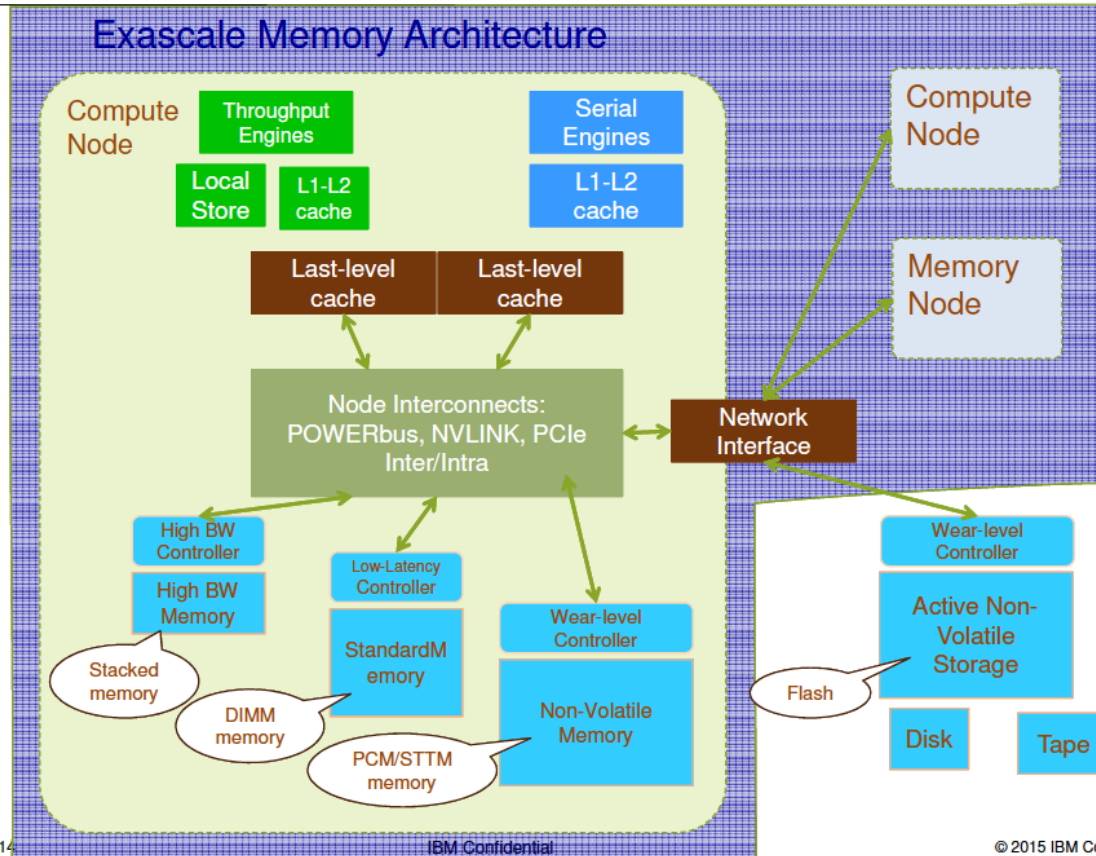
PROJECT	DESCRIPTION
High-resolution NGC4038/39 galaxy merger	This project aims at describing self-consistently the merger of the Antennae(NGC4038/39) galaxies.

At the bottom left, there is a 'Go to top' link, and at the bottom right, there is an 'OPEN DATA' button.

Base de données de simulations réalisée par Damien Chapon (SEDI)

Passage à l'exascale : Une rupture technologique et un défi majeur

There will be significant innovation in the memory structure, active elements and systems software



Le passage à l'exascale représente une difficulté majeure identifiée par toutes les instances du calcul

- ⇒ Difficultés d'adapter les codes qui ont nécessité des dizaines d'années
- ⇒ Problème de masse critique
- ⇒ Utilisation intensive de la maison de la simulation (mais force limitée)

Projet de développement d'un code AMR moderne

CANOPY based on P4EST

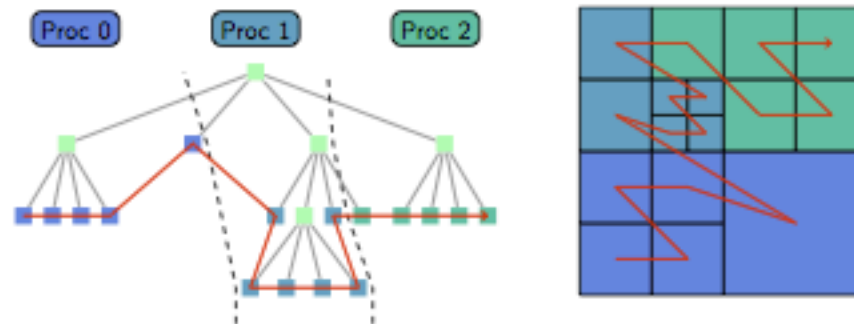
p4est
canoP

What is p4est ?

- Provides distributed parallel, efficient implementations of algorithms behind **cell-based Adaptive Mesh Refinement**.
- No numerical schemes (FE, FV, DG) embedded, left to the end-user.

Octree-based AMR

Recursive subdivision and space-filling curves (SFC)

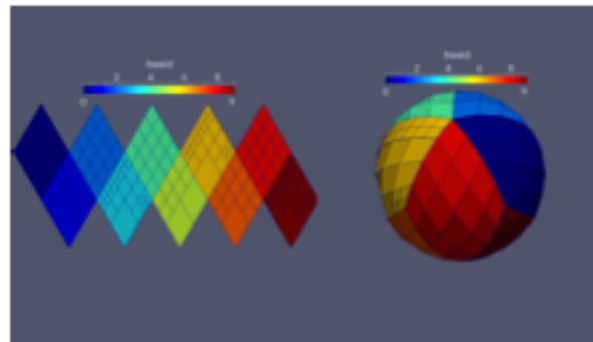


- ▶ 1:1 relation between leaves and elements → **efficient encoding**
- ▶ Map a 1D curve into 2D or 3D space → **total ordering**
- ▶ Recursive self-similar structure → **scale-free**
- ▶ Tree leaf traversal → **cache-efficient**



p4est: main or keys ideas

- The **z-curve (Morton index)** Space Filling Curve is everywhere
 - for cells layout
 - for indexing topological objects: faces, edges, corners, ...
- To develop an entire app, need to learn a few concepts:
 - ① **p4est_connectivity**: (optionnally **p4est_geometry**)
create / specify a coarse mesh, each hexahedral cell will be the root of an octree. Connectivity can be just a **regular single square domain**, up to more complex structured domain e.g. **cylindrical, spherical** or even **unstructured at coarse level** (see below). Need a geometrical transformation to go from logical octree space to physical space.
 - ② **p4est**: collective operations to build/modify the forest of octrees
 - ③ **p4est iterate**: sweep forest of octrees (kind of smart *for loop*)





Conclusions

- la simulation numérique est devenue un *outils* quotidien
- haut niveau de technicité => *expertise instrumentale*
- maison de la simulation : incontournable outils de mutualisation
=> *Reste néanmoins des aspects spécifiquement astrophysiques*
- maintenir un bon équilibre entre
 - développements
 - exploitations théoriques
 - support observationnel