

# LES SIMULATIONS NUMÉRIQUES

## LES SIMULATIONS NUMÉRIQUES À L'IAP DE 1960 À 2000

**La simulation numérique est devenue un outil incontournable en astrophysique, non seulement pour tester des prédictions théoriques, mais aussi pour préparer et analyser des relevés observationnels. L'IAP ne fait pas exception à la règle et a donc développé une activité numérique forte et pluridisciplinaire, même si la composante dominante reste la cosmologie et la formation des galaxies.**

La simulation numérique à l'IAP a été introduite dans les années soixante par Michel Hénon avec l'apparition des premiers ordinateurs. Avant cela, les calculs numériques étaient faits à la main par des calculatrices (figure 1). Après avoir développé un calculateur analogique (figure 2), Hénon s'est tourné vers des moyens de calcul plus performants disponibles aux Etats-Unis et réalisa ses premières simulations à N-corps (figure 3) qui ne comportaient à l'époque que 100 particules au plus. Après les travaux pionniers d'Hénon, mis à part quelques contributions isolées (figure 4), les simulations numériques n'ont véritablement pris leur essor dans le laboratoire qu'à partir du début des années 90, notamment avec les travaux de François Bouchet et ses collaborateurs, sur les simulations cosmologiques à N-corps de la formation des grandes structures de l'univers (figure 5) et les simulations de réseaux de cordes cosmiques (figure 6). Cela a été suivi naturellement par la création du projet GalICS, dans lequel des modèles semi-analytiques de formation des galaxies développés à l'IAP étaient couplés à des simulations de matière noire (figures 7 et 8).



Figure 1 : Les calculatrices de l'IAP en 1955, avant l'ère des ordinateurs.



Figure 2 : Le calculateur analogique que développait Michel Hénon à l'IAP, avant d'abandonner cette approche au profit d'ordinateurs plus perfectionnés.

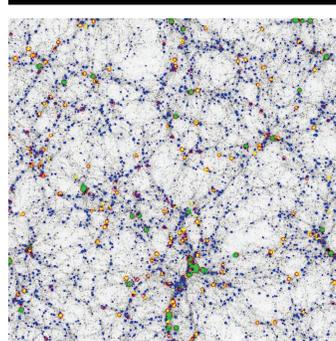
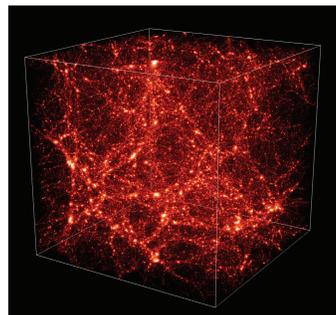


Figure 4 : Simulation de la distribution de matière noire dans un Univers de matière noire froide standard, réalisée en 1999 avec un code en arbre massivement parallèle sur le T3E du centre de calcul de l'IDRIS, dans le cadre du projet GalICS. Elle comportait 16 millions de particules dans un cube de 150 Mpc de côté. En bas, les galaxies extraites de la simulation précédente avec le modèle semi-analytique de formation des galaxies GalICS. En bleu, les galaxies faiblement massives, en jaune, les galaxies de taille moyenne (telles que la Voie Lactée) et en vert les galaxies très massives. Finalement, en gris, la distribution de matière noire sous-jacente.

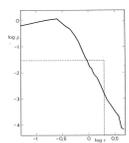


Figure 5 : Relaxation d'une "sphère de Hénon": cette figure, extraite d'un article séminal de Michel Hénon (1964, Annales d'Astrophysique 27, page 83) représente le profil de densité d'un amas d'étoiles simulé. C'est probablement la première simulation à N-corps réalisée par un astrophysicien français.

Elle fut réalisée par Michel Hénon, alors chercheur à l'IAP, sur l'ordinateur IBM 7090 de l'Université de Princeton. Dans cette simulation, chaque « particule » correspond à une coquille sphérique d'étoiles. L'objet de la simulation est de modéliser l'interaction gravitationnelle entre les différentes coquilles et de voir vers quel état d'équilibre relaxe un amas d'étoiles sous les effets de sa propre gravité.

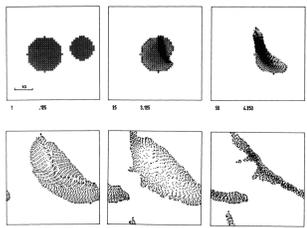


Figure 6 : Simulations de l'évolution de la distribution de matière noire dans un cube de 64 Mpc de côté. À gauche, les particules sont disposées initialement aléatoirement selon un bruit blanc. Au milieu, un modèle de matière noire froide est considéré, alors qu'à droite un modèle de matière noire chaude est étudié. Ces simulations, comportant 32265 particules, furent réalisées en 1991 sur un Cray Y-MP par F. Bouchet et L. Henquist avec leur code en arbre.

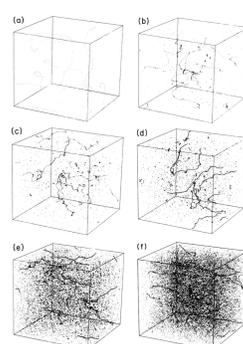


Figure 7 : Principe des modèles semi-analytiques appliqués aux simulations de matière noire: un arbre de fusion des concentrations compactes de matière noire, les halos, est extrait d'une simulation à N-corps. Des recettes basées sur les processus physiques complexes entrant dans la physique des barions et des galaxies, décrivent par exemple l'évolution spectrale des différentes populations d'étoiles dans les galaxies au cours de leur histoire, sont appliquées à cet arbre de fusion pour créer celui de la fusion des galaxies. L'IAP fut l'un des pionniers des modèles semi-analytiques d'évolution des galaxies avec le développement d'outils sophistiqués tels PEGASE (par M. Foc et B. Rocca) et GalICS (par B. Guiderdoni, F. Bouchet et leurs collaborateurs).

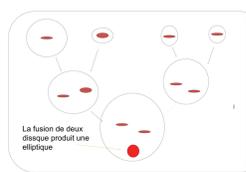


Figure 8 : La fusion de deux disques produit une ellipse.

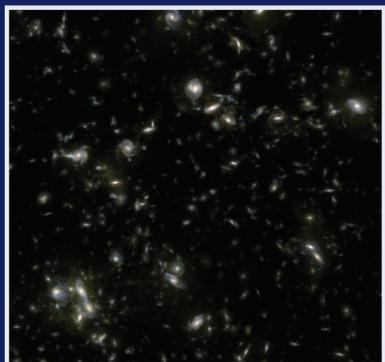


Figure 9 : Une image simulée d'une petite portion du ciel extraite de la simulation Mare Nostrum. Chaque petite concentration claire représente une galaxie. Image réalisée par C. Pichon.

Figure 4 : Simulation de la collision de deux nuages d'hydrogène neutre interstellaire réalisée en 1980 par J.-P. Chabrier et B. Lazareff en utilisant une méthode N-corps.

## DEPUIS LES ANNÉES 2000

Les simulations en cosmologie ont connu une nouvelle expansion dans les années 2000, notamment par l'inclusion de la dynamique du gaz dans les simulations avec le projet national HORIZON, auquel des membres de l'IAP ont participé de manière très active. Au cours de ce projet, deux simulations majeures furent réalisées, les plus grandes au monde au moment de leur genèse: **la simulation cosmologique de matière noire Horizon-4** (figure 9) ainsi que **la simulation hydrodynamique de formation des galaxies Mare-Nostrum** (figures 10).

Les simulations cosmologiques de la formation des galaxies et des grandes structures de l'Univers ainsi que leurs applications aux observations (figures 11 et 12), représentent maintenant un secteur de recherche important à l'IAP, mais ce ne sont pas les seules activités de simulation du laboratoire, loin s'en faut.

Il faut en effet également mentionner de nombreuses autres contributions significatives au cours de ces dix dernières années sur des domaines variés de l'astrophysique, qui révèlent le caractère pluridisciplinaires du laboratoire et sa richesse sur le plan de l'activité numérique.

En particulier, un effort soutenu a été maintenu pour simuler l'évolution dynamique des environnements stellaires et interstellaires des planètes et exoplanètes en présence des champs magnétiques (figure 13) avec des comparaisons détaillées des résultats des calculs numériques aux observations.

Parmi les autres investigations, conduites sur une base plus ponctuelle, on peut citer la simulation de disques d'accrétion protoplanétaires autogravitants et magnétisés, l'évaporation de Jupiters-chauds, la modélisation numérique des sursauts gamma, le développement de solutions des équations de Vlasov-Poisson dans l'espace des positions et des vitesses (figure 14) ou encore l'étude numérique des effets de la métrique autour d'une singularité (figure 15).

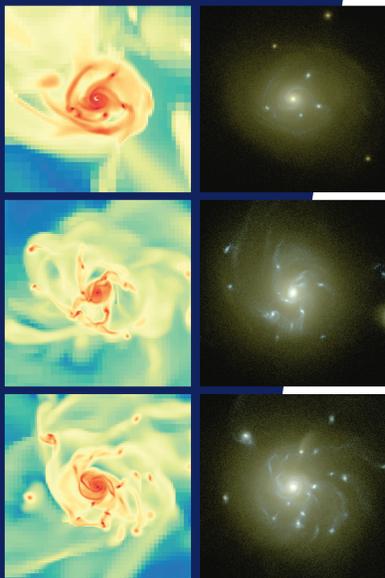


Figure 12 : Effets de différents processus de rétroaction dans des simulations. Des images du gaz (à gauche) et de la luminosité stellaire (à droite) d'une galaxie et de ses satellites sont extraites de simulations hydrodynamiques cosmologiques. En bas, aucun effet de rétroaction n'est pris en compte. Au milieu, les effets de rétroaction des étoiles entrent en jeu. En haut, toute la physique de rétroaction joue son rôle en incluant un noyau actif central. En attribuant le refroidissement du gaz et la formation d'étoiles, la présence du noyau actif de galaxie a un effet dramatique sur la structure final du système, qui comporte moins de sous-structures dans les deux images du haut que dans les quatre images du bas. La compréhension des effets de rétroactions reste l'un des grands défis de la cosmologie numérique, notamment pour être capable de réaliser des simulations numériques suffisamment précises par rapport aux grands relevés à venir, tels qu'Euclid.

Images réalisées par Y. Dubois.

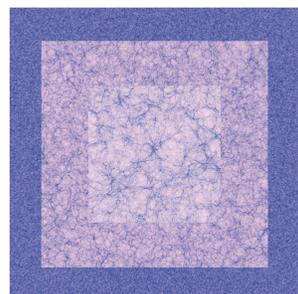


Figure 9 : Vue multi-résolution de la simulation Horizon-4. Cette simulation, réalisée par le projet HORIZON avec le code à raffinement adaptatif de grille RAMSES sur la machine Bull Platine du CEA, comportait près de 70 milliards de particules dans un cube de 2800 Mpc de côté. C'était en 2007 la plus grande simulation de matière noire jamais réalisée dans le monde. Image réalisée par C. Pichon.



Figure 10 : Vue des champs physiques de la simulation Mare Nostrum exposée en 2009 dans la station Luxembourg du RER B à Paris dans le cadre de l'année Mondiale de l'Astronomie. Cette image, faite par C. Pichon, comporte 40000x6000 pixels ! La simulation fut réalisée en 2007 par le projet HORIZON avec le code RAMSES dans le centre de calcul Mare Nostrum de Barcelone, du nom de la chapelle dans laquelle le supercalculateur était installé. Cette simulation hydrodynamique de la formation des galaxies, qui rend également compte des processus physiques entrant dans l'évolution du gaz et des étoiles, fut la plus grande de sa catégorie dans le monde au moment où elle fut réalisée.

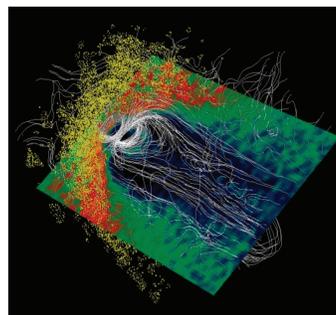


Figure 13 : Magnétosphère simulée d'une planète tellurique plongée dans un vent stellaire: les lignes de champ magnétiques en blanc, la densité de plasma équatoriale en vert. Le vent stellaire se propage de la gauche vers la droite. Le saut en densité en forme d'arc jaune correspond à l'arc de choc qui se forme quand les particules du vent stellaire sont stoppées et réfléchies par le champ magnétique planétaire. Visualisation obtenue grâce au logiciel 3Dvision à partir d'une simulation réalisée par Ben-Jaffel et ses collaborateurs.

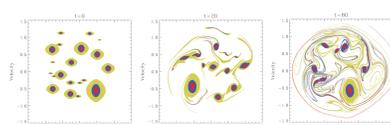


Figure 14 : Evolution de la fonction de distribution dans l'espace des phases d'un ensemble de halos composés de matière autogravitante non collisionnelle. Le schéma numérique employé utilise une approche directe dans l'espace des phases de la résolution des équations de Vlasov-Poisson s'appuyant sur la méthode dite du "waterbag". Simulation réalisée par S. Colombi et J. Touma.

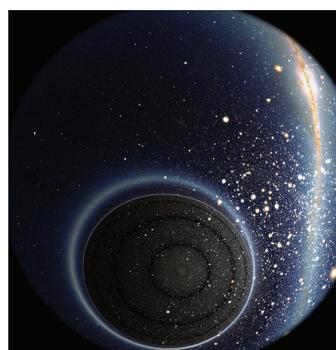


Figure 15 : En orbite rapprochée autour d'un trou de ver. Image réalisée par A. Diaz-Valio.