

Les simulations numériques en astrophysique

Frédéric Bournaud
CEA Saclay, - Service d'Astrophysique

Comment les galaxies et les grandes structures de l'Univers se sont-elles formées ? Qu'est ce qui déclenche la formation de nouvelles étoiles dans les nébuleuses gazeuses du milieu interstellaire ? Ces questions fondamentales de l'astrophysique moderne reposent sur des lois physiques a priori simple à décrire mathématiquement : la principale force est la force de gravité, et l'on sait calculer de manière exacte les forces de gravité qu'un objet exerce sur un autre. Toutefois, le nombre d'étoiles dans une galaxie comme notre Voie Lactée approche les cent milliards, et le nombre de galaxies dans l'Univers est encore plus grand.

Les équations qui gouvernent ces phénomènes astrophysiques sont donc relativement simples, mais elles sont extrêmement nombreuses. Pour les résoudre, les astrophysiciens ont donc recours à la " simulation numérique " sur des supercalculateurs, qui permettent de calculer l'évolution de régions d'Univers, de galaxies, ou de nuages de gaz interstellaire au cours du temps.

La gravité dans les simulations numériques

L'Univers dans un ordinateur

Aucun ordinateur, même les plus puissants supercalculateurs au monde, ne peuvent traiter exactement les cent milliards d'étoiles d'une galaxie : sans parler même de calculer les forces et mouvements, il serait impossible de stocker la position et la vitesse de chaque particule en mémoire. Une galaxie est donc modélisée avec un certain nombre de particules, qui représentent chacune un groupe d'étoiles. Les premières simulations dans les années 1970 ne reposaient que sur quelques dizaines de particules, et ne pouvaient donc décrire que les plus importantes des sous-structures. Les simulations numériques modernes emploient plusieurs millions de particules et peuvent donc " résoudre " des structures de plus en plus fines jusqu'aux régions de formation de nouvelles étoiles au sein des galaxies.

Malgré l'utilisation de particules moins nombreuses que les étoiles dans une galaxie, le calcul des forces gravitationnelles doit être accéléré par l'emploi

d'algorithmes astucieux pour raccourcir le temps de calcul. En appliquant la formule de Newton, la force exercée par une particule sur une autre est proportionnelle à l'inverse du carré de la distance qui les sépare. L'emploi de cette formule est néanmoins extrêmement coûteux : d'une part, il nécessite d'effectuer le calcul pour toutes les paires de particules, soit $n \times (n-1)$, environ n^2 pour n particules. D'autre part, chaque calcul de force nécessite le calcul d'un carré, c'est-à-dire une multiplication, opération bien plus coûteuse qu'une addition pour un ordinateur. Pour conserver des temps de calcul raisonnables (quelques semaines sur un supercalculateur, soit des décennies sur un ordinateur de bureau), il faudrait réduire le nombre de particule à quelques milliers, et non quelques millions, dégradant d'autant la possibilité de résoudre la formation de petites structures dans l'objet simulé.

Pour calculer les forces de gravité et l'évolution du système en un temps raisonnable, la technique la plus rapide consiste à découper l'espace selon une grille la plus fine possible (figure 1), et de calculer la densité de masse contenue dans chaque cellule de cette grille : opération rapide, puisqu'il s'agit d'additionner la masse des particules se trouvant dans chaque cellule.

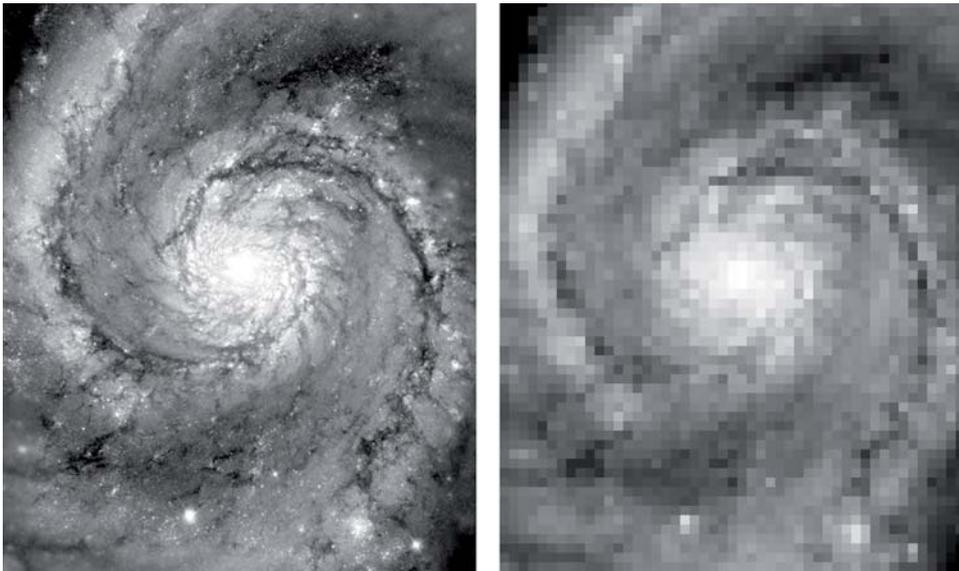


Figure 1 : A gauche, la galaxie spirale Messier 51, observée par le télescope spatial Hubble. A droite, représentation d'une carte de densité sur une grille numérique. L'emploi de telles grilles permet de calculer les forces gravitationnelles de manière très rapide. Par contre, pour décrire les structures fines d'une telle galaxie, il est nécessaire d'employer des grilles très fines (plus que sur cet exemple), de modéliser les étoiles avec plusieurs millions de particules, et donc de disposer de puissants calculateurs. (NASA/HST)

On obtient alors une carte de la densité, que l'on peut transformer en carte de l'énergie potentielle gravitationnelle. Pour connaître la force subie par une particule de la part de toutes les autres, il suffit alors de calculer la dérivée de cette énergie à l'endroit où se trouve cette particule, en calculant la différence d'énergie entre deux cellules voisines. Cet algorithme semble plus complexe que le calcul direct des forces entre chaque paire de particules, mais il est nettement plus efficace, car il nécessite $n \log(n)$ opérations pour n particules. Lorsque n est grand (des millions), $n \log(n)$ est bien plus petit que n^2 .

La formation des galaxies dans l'Univers

Une radiation micro-ondes, le " rayonnement fossile ", baigne l'ensemble de l'Univers et donne une image très précise de son état 300000 ans après le Big Bang - un instant comparé aux 13 milliards d'années de l'Univers actuel. Cette image montre des régions plus denses et d'autres moins denses, mais sans organisation spécifique.

En utilisant cette image comme point de départ, ou " condition initiale " d'une simulation numérique, les astrophysiciens ont pu reconstituer l'ensemble de l'évolution de cet Univers très jeune jusqu'à l'Univers actuel, sous l'effet des forces de gravité : les sur-densités initiales attirent à elles de plus en plus de masse, et se contractent de plus en plus, prenant la forme de

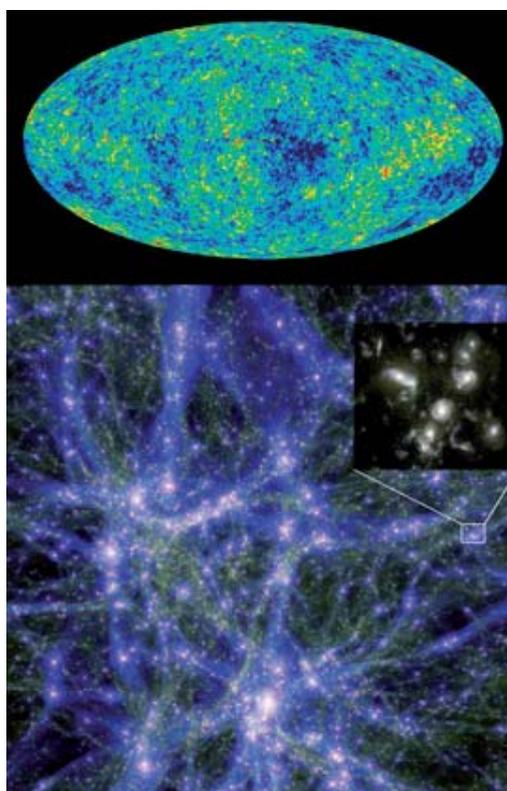


Figure 2 : Les fluctuations primordiales de l'Univers vue dans le rayonnement fossile (en haut). L'Univers primordial était presque homogène, avec des petites fluctuations plus massives (jaune/rouge) ou moins massives (bleu/noir). La simulation numérique permet d'expliquer la formation des galaxies à partir de cette carte initiale, et sous l'effet des forces de gravité. La simulation vue ici reproduit l'Univers après plusieurs milliards d'années d'évolution. Chaque point brillant est une galaxie, le plus souvent avec une structure spirale similaire à notre Voie Lactée. Les galaxies s'alignent le long de filaments cosmologiques, et des amas de galaxies se forment aux intersections de filaments. (R. Teyssier/CEA)

galaxies naines. Ensuite, lorsque deux petites galaxies naines se trouvent suffisamment proches l'une de l'autre, elles vont s'attirer, entrer en collision puis fusionner en de galaxies de plus en plus massives, jusqu'aux grandes galaxies spirales (comme la Voie Lactée) et elliptiques de l'Univers actuel. Ces simulations numériques montrent donc une origine " hiérarchique " des galaxies, les premières formées étant relativement petites, puis croissant par fusions successives. Les simulations montrent également que les galaxies ont tendance à s'aligner en de longs filaments, au croisement desquels se forment les amas de galaxies.

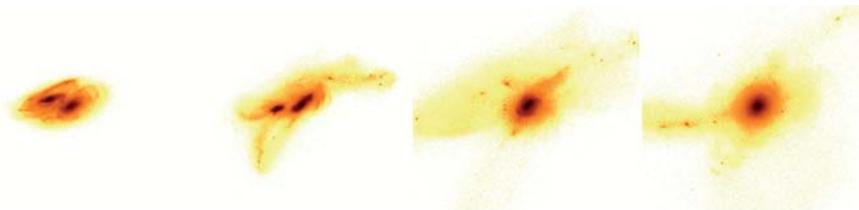


Figure 3 : Simulation d'une collision de deux galaxies spirales. Les deux galaxies fusionnent en une seule galaxie plus massive. Les spirales (disques en rotation) ont ici été transformées en une galaxie elliptique, sphéroïdale. Des filaments de matière ont été arrachés sous l'effet des marées exercées par chaque galaxie sur sa voisine. La durée de cette séquence est 700 millions d'années.
(F. Bournaud/CEA)

Physique du gaz et hydrodynamique

Gaz, chauffage et refroidissement

Les étoiles sont des corps quasi-ponctuels à l'échelle de l'Univers, elle n'interagissent donc que par gravité, et les collisions entre elles sont extrêmement rares. Par contre, le gaz interstellaire est plus diffus, et ses atomes entrent en collisions mutuelles, si bien que son évolution est régit comme celle de tout gaz terrestre, par exemple l'atmosphère : la gravité n'est pas la seule force qui agit sur le gaz ; les forces de pression hydrodynamique jouent également un rôle important dans l'évolution du gaz. Les forces de pressions dépendant de la température, les simulations numériques doivent donc déterminer à tout instant et en tout point la température du gaz.

Par exemple, un gaz interstellaire comprimé verra sa température, et donc sa pression, augmenter - exactement comme un gaz comprimé dans un piston sur Terre. Pour modéliser ces phénomènes, la simulation numérique à a nouveau recours à la discrétisation sur une grille : dans chaque cellule, la masse de gaz et la vitesse du gaz sont stockées en mémoire. L'algorithme identifie les

zones de convergence des vitesses (Figure 4), et la température du gaz dans ces zones augmente. A l'inverse, dans les zones de divergence, le gaz se décompresse donc se refroidit.

Un second processus de refroidissement intervient : lorsque le gaz devient très dense, ses atomes interagissent fortement les uns avec les autres, ce qui conduit à l'émission de photons lumineux, qui emportent donc une partie de l'énergie de ce gaz, lui permettant à nouveau de se refroidir. L'évolution du gaz interstellaire est donc complexe : la compression du gaz augmente sa température, mais une fois qu'il est très fortement comprimé, le gaz se refroidit spontanément en rayonnant son énergie sous forme de lumière.

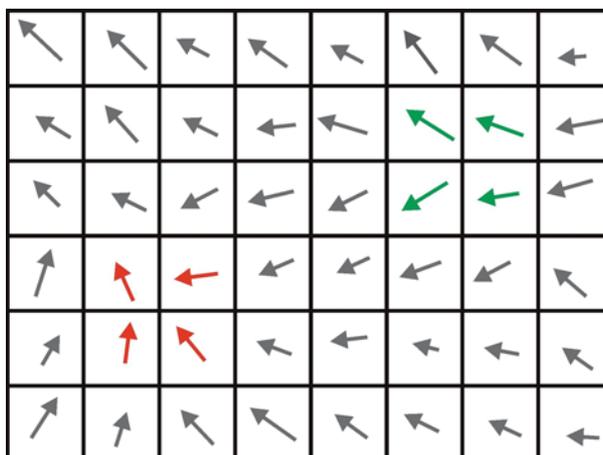


Figure 4 : Principe des simulations hydrodynamiques sur grille : l'espace est découpée en cellules, et le vecteur représente la vitesse du gaz dans chaque cellule. Dans les zones de convergence, comme celle indiquée en rouge, le gaz est comprimé et chauffé. Dans les zones de divergence (en vert), le gaz se détend et se refroidit.

Formation d'étoiles

Les simulations numériques modélisant les phénomènes de refroidissement et chauffage du gaz permettent d'étudier la formation de nouvelles étoiles dans le milieu interstellaire. Ces simulations montrent entre autres qu'un processus important de la formation d'étoiles est l'instabilité de refroidissement. Lorsqu'une région un peu plus dense apparaît dans le gaz interstellaire, elle se refroidit plus rapidement que le gaz environnant. Sa pression diminue, et devient donc plus faible que la pression du gaz plus diffus et chaud qui entoure cette région. Cette pression extérieure contracte donc la région dense, qui devient ainsi encore plus dense, se refroidit encore plus vite, et le processus s'emballe. Ce processus conduit à la formation de cœurs très denses dans le gaz interstellaire : des proto-étoiles. (Figure 5)

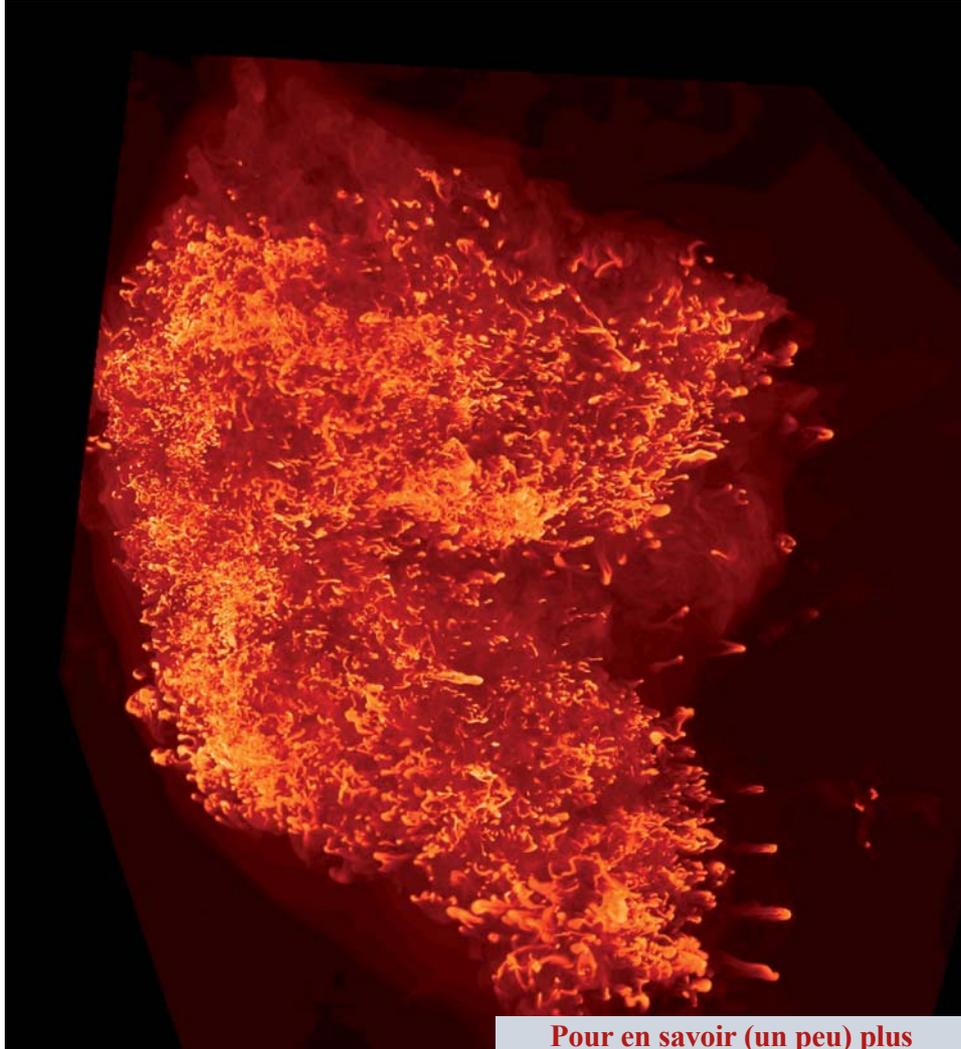


Figure 5 : Simulation hydrodynamique du gaz interstellaire dans une petite région d'une galaxie. Des régions plus denses se sont formées, refroidies, et devenues de plus en plus denses. Ces régions sont des cœurs pré-stellaires ou de nouvelles étoiles vont se former. L'ensemble de l'image montre ici la naissance d'un amas d'étoiles. (E. Audit/CEA)

Pour en savoir (un peu) plus

