



1. DEUX GALAXIES BRILLANTES, l'une elliptique (*en haut, à gauche*) et l'autre spirale (*en haut, à droite*) apparaissent dans l'amas de la Chevelure de Bérénice sur cet assemblage d'images prises par le télescope spatial *Hubble*, en 1994. Cet amas est l'un des premiers amas de galaxies identifié par les astronomes. La plupart des autres taches de l'image sont des galaxies plus lointaines encore.

que la masse représentée par les galaxies visibles. Les astronomes en déduisirent que les amas étaient composés essentiellement de matière sombre, une matière invisible, mais massive. Quelle est exactement cette matière ?

Aujourd'hui encore, la nature de la matière sombre et la répartition hétérogène des galaxies confondent les astronomes. Le problème a même été aggravé, au milieu des années 1960, après la découverte du fond diffus cosmologique : ce rayonnement, qui indique la structure de l'Univers quelques milliers d'années après le Big Bang, est remarquablement uniforme. Comment un Univers très uniforme s'est-il transformé en un Univers hétérogène tel que nous le voyons ? Les astronomes

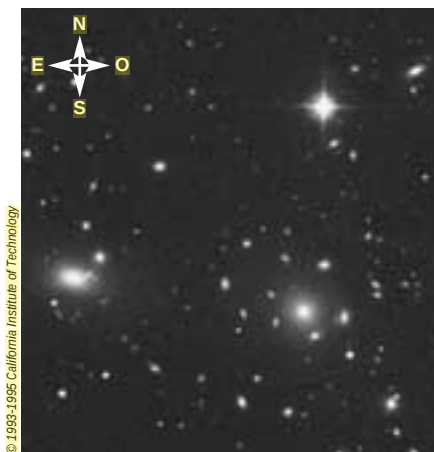
imaginent que de minuscules hétérogénéités initiales ont grossi jusqu'à devenir les galaxies que nous connaissons aujourd'hui, mais les détails de cette croissance sont encore discutés. Pour ce qui concerne la matière sombre, les astronomes en savent un peu plus qu'à l'époque de Zwicky, mais ils ignorent toujours la nature de la majeure partie de l'Univers.

La lumière de la matière sombre

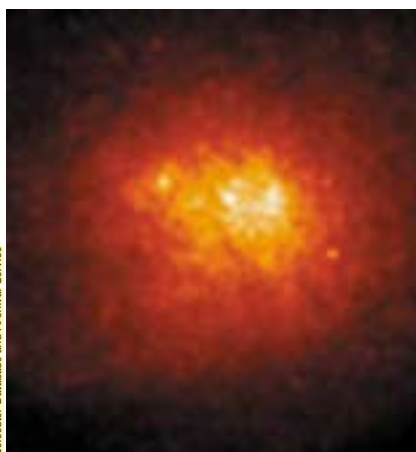
Aiguillonnés par les questions ouvertes, les astronomes ont intensifié la recherche d'amas de galaxies au cours des 40 dernières années. On en connaît aujourd'hui 10 000 environ. En 1950,

en recensant les galaxies sur des photographies du ciel boréal prises à l'aide du télescope du mont Palomar, en Californie, l'astronome américain George Abell dressa la première liste des amas. Au début des années 1970, les astronomes pensaient avoir compris les propriétés fondamentales des amas : ils étaient constitués de galaxies en mouvement, liées entre elles par beaucoup de matière sombre. Ces objets étaient stables et immuables.

Puis en 1970, le satellite *Uhuru* («liberté» en swahili, en l'honneur de son lancement au Kenya) commença à observer le rayonnement X des amas, jusqu'alors quasi inaccessible aux astronomes. En pointant *Uhuru* vers les amas de la Vierge et de la Chevelure



© 1993-1995 California Institute of Technology



Leicester Database and Archival Service

2. L'AMAS DE LA CHEVELURE DE BÉRÉNICE paraît bien différent selon qu'il est observé en lumière visible (à gauche) ou en rayons X (à droite). En lumière visible, ce n'est qu'un simple ensemble de galaxies, mais le rayonnement X révèle que c'est une gigantesque boule de gaz chaud de presque cinq millions d'années-lumière de diamètre.

de Bérénice, les astronomes découvrirent que les amas ne se composent pas seulement de galaxies, mais aussi des quantités considérables de gaz situé entre les galaxies. Trop ténu pour être observable en lumière visible, le gaz est si chaud – plus de 25 millions de degrés – qu'il émet des torrents de rayonnement X (les électrons des atomes ionisés par le chauffage émettent du rayonnement X lorsqu'ils sont freinés par les interactions avec les autres particules).

Ce gaz constitue 20 pour cent de la matière sombre : sa masse totale est supérieure à la masse de toutes les galaxies mises ensemble (sur la masse totale d'un amas, les galaxies représentent moins de cinq pour cent de la masse, le gaz intergalactique entre 10 et 30 pour cent, le reste étant de nature inconnue). Le terme «amas de galaxies»

est donc mal choisi : ces objets sont des ballons de gaz où les galaxies sont immergées, comme des pépins dans une pastèque.

Depuis 1970, le rayonnement X des amas a été beaucoup étudié, notamment par des satellites tels que ROSAT, ASCA (acronyme d'*Advanced Satellite for Cosmology and Astrophysics*, soit «satellite avancé pour la cosmologie et l'astrophysique») ou l'Observatoire X Einstein. Le satellite ROSAT a été le premier instrument à prendre des images du ciel entier dans le domaine X. Bien adapté à l'observation de grands objets diffus comme les amas, il observe ces régions en grand détail depuis 1990 et vient d'arrêter sa mission à la fin 1998, en raison d'une panne.

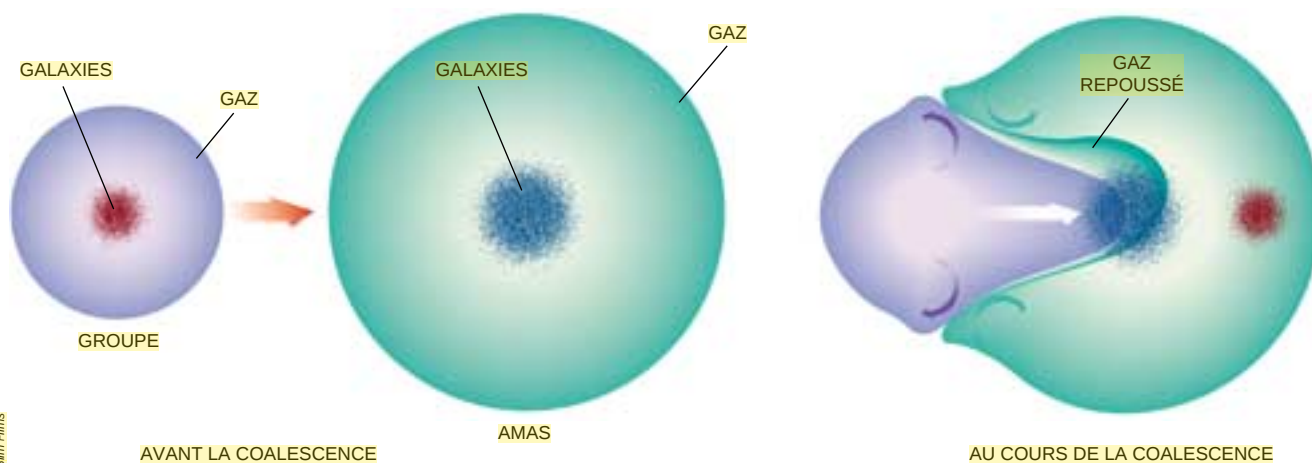
L'image X de l'amas de la Chevelure de Bérénice est assez régulière, avec

quelques blocs (voir la figure 2). Ces blocs semblent être des groupes de galaxies, des sortes de mini-amas. Un bloc, au Sud-Ouest, se dirige vers la partie principale de l'amas, qui comprend d'autres groupes. En revanche, l'amas de la Vierge semble moins homogène. Les régions de forte émission X sont des galaxies plutôt que des poches de gaz (voir la figure 5). Seule la région la plus centrale est ronde et régulière.

L'analyse de ces images X indique une formation des amas par fusion de groupes de galaxies plus petits. Les blocs visibles au centre de l'amas de la Chevelure de Bérénice sont vraisemblablement des groupes de galaxies en cours d'assimilation. L'amas de la Vierge semble être moins évolué : il attire encore la matière environnante ; si cette attraction se poursuit au même rythme, il ressemblera à l'amas de la Chevelure de Bérénice dans quelques milliards d'années. Ainsi les amas ne sont probablement pas immuables : ils avalent et digèrent la matière avoisinante.

Prendre la température

Après que les astronomes eurent obtenu les premières bonnes images en rayons X, au début des années 1980, ils cherchèrent à établir des cartes de la température du gaz dans les amas. Toutefois, ces mesures nécessitent un enregistrement des rayonnements X à toutes les longueurs d'onde et en chaque point des amas. Les premières cartes thermométriques d'amas, qui indiquent la température du gaz dans les différentes régions des amas, n'ont été obtenues qu'en 1994.



Sfrin Films

3. EN ABSORBANT LES GROUPES DE GALAXIES AVOISINANTS, les amas atteignent des tailles colossales. Attiré par la gravité, un groupe fonce dans l'amas, repoussant le gaz. Les galaxies elles-mêmes traversent l'amas facilement : les galaxies du groupe et celles de l'amas sont très éloignées les unes des autres, de

sorte qu'elles interagissent peu, et le gaz ténu ne s'oppose pas à leur progression. Finalement, les galaxies et le gaz des deux amas se mélangent, formant un amas plus gros. Ce dernier attire d'autres groupes jusqu'à épuisement des groupes de galaxies situés à proximité.

Ces cartes ont montré que la formation des amas est un mécanisme violent. Les images de l'amas Abell 2256, par exemple, indiquent que l'émission X présente deux pics d'émission (voir la figure 4). Le pic occidental est légèrement écrasé, suggérant qu'un groupe ayant foncé dans l'amas principal a balayé de la matière comme un chasse-neige. Une carte thermométrique corrobore cette interprétation. Le pic occidental est plus froid : sa température est caractéristique du gaz dans un groupe de galaxies. Comme les groupes sont plus petits que les amas, les forces gravitationnelles en leur sein sont plus faibles ; par conséquent, la vitesse des molécules du gaz – c'est-à-dire leur température – est inférieure (les groupes sont environ 50 000 milliards de fois plus massifs que le Soleil et leur température atteint dix millions de degrés. Les amas, eux, ont une masse 300 000 milliards de fois supérieure à celle du Soleil, et une température de 60 millions de degrés (l'amas le plus massif connu est cinq fois plus lourd que les amas moyens et près de trois fois plus chaud).

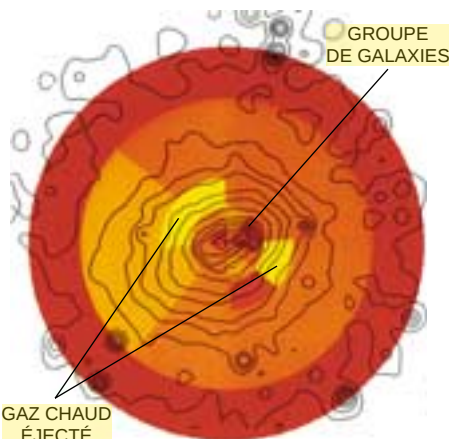
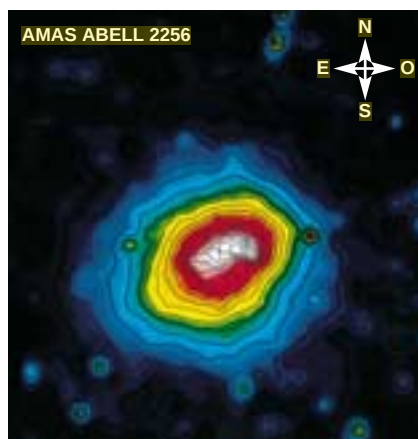
Dans l'amas Abell 2256, deux régions chaudes apparaissent le long d'une ligne perpendiculaire au mouvement présumé du groupe. La chaleur semble être engendrée lorsque de la matière éjectée du groupe s'écrase dans le gaz de l'amas principal. Ces observations s'accordent avec les simulations numériques de fusion de groupes. Le groupe devrait pénétrer au centre de l'amas en quelques centaines de millions d'années. Abell 2256 évolue donc encore.

Les dernières étapes d'une fusion se manifestent dans un autre amas, Abell 754. Cet amas a deux particularités : d'abord, les images de cet amas en lumière visible révèlent deux blocs séparés de galaxies ; ensuite, les observations X font apparaître une barre d'où s'échappe le gaz chaud de l'amas. L'un des groupes de galaxies se trouve dans la région de la barre, et l'autre en bordure de la région très chaude, à l'Ouest.

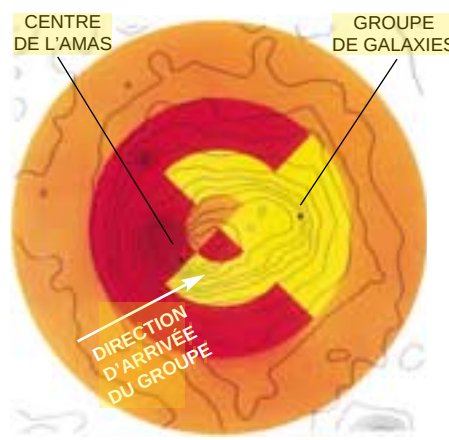
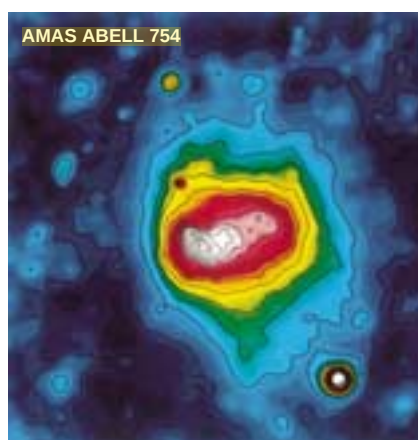
Pourquoi cette structure ? Supposons que l'on gonfle un ballon avec de l'eau et quelques cailloux, puis qu'on le lance dans une piscine. Le ballon représente les groupes qui fusionnent ; l'eau représente le gaz ; les cailloux, les galaxies ; la piscine, l'amas principal. Lorsque le ballon heurte l'eau de

la piscine, il se déchire. Son eau reste en surface et ne se mélange que très lentement, mais les cailloux s'enfoncent dans la piscine. Un processus similaire s'est apparemment déroulé dans

Abell 754. Le gaz du groupe absorbé a soudainement été bloqué par le gaz de l'amas, tandis que les galaxies du groupe ont traversé l'amas jusqu'à son extrémité opposée.



4. TROIS AMAS DE GALAXIES à divers stades de leur évolution. À gauche, les images obtenues par détection des rayons X et, à droite, les cartes des températures. Le premier amas, Abell 2256, absorbe un petit groupe de galaxies, qui est identifié par sa température relativement basse. Sur les cartes, le rouge est comparativement froid, l'orange tiède et le jaune chaud.

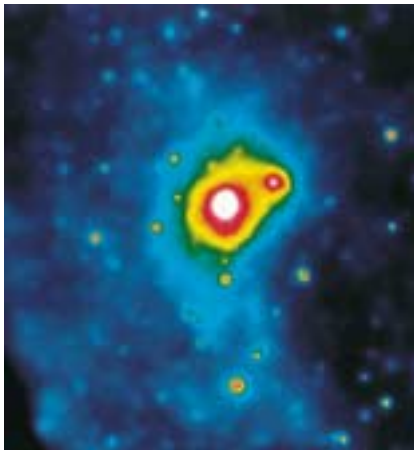
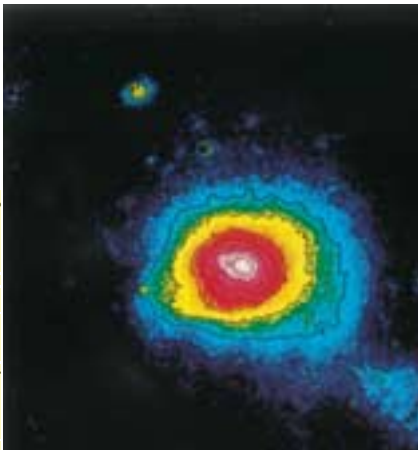


Le deuxième amas, Abell 754, absorbe également un groupe de galaxies, mais plusieurs centaines de millions d'années se sont déjà écoulées depuis le début de la rencontre. Le groupe absorbé est vraisemblablement entré par le Sud-Est (en bas à gauche), parce que l'amas est allongé dans cette direction. Les galaxies du groupe se sont séparées de leur gaz et ont traversé l'amas.



Pour l'amas Abell 1795, plusieurs milliards d'années ont passé depuis son dernier repas. Son image aux rayons X et sa carte de température ont une allure analogue. Au cœur de l'amas se trouve une région froide, une zone de gaz dense qui a rayonné l'essentiel de sa chaleur.

J. Patrick Henry, Ulrich G. Briel et Hans Böhringer



5. LES IMAGES EN RAYONS X des amas de la Chevelure de Bérénice (à gauche) et de la Vierge (à droite) montrent le gaz intergalactique chaud qui domine la partie lumineuse de ces structures. Le gaz est plus régulièrement réparti dans la Chevelure de Bérénice que dans l'amas de la Vierge. Ce dernier est vraisemblablement à une étape antérieure de son évolution.

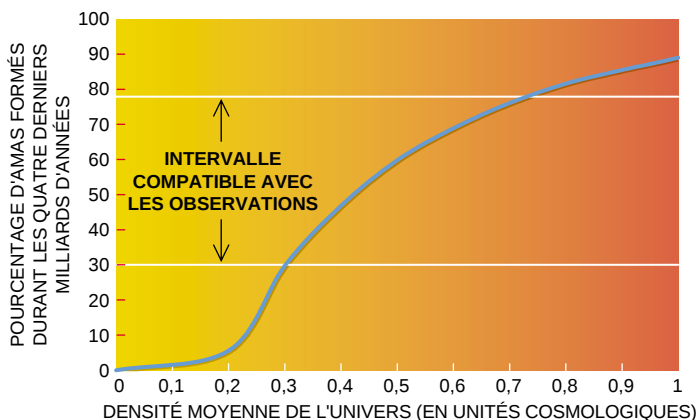
De l'évolution des amas à l'évolution cosmique

L'expansion de l'Univers a commencé lors du Big Bang, il y a environ 15 milliards d'années. Depuis cette époque, tous les corps qui ne sont pas liés les uns aux autres par la gravité ou par une autre force s'écartent. Toutefois, l'expansion cosmique se poursuivra-t-elle indéfiniment, ou la gravité de toute la matière de l'Univers suffira-t-elle pour l'arrêter? La réponse à cette question est difficile, car elle dépend du recensement minutieux de toute la matière de l'Univers, tâche ô combien délicate, notamment parce qu'une grande partie de cette matière est invisible.

Un recensement fondé sur l'étude de l'évolution des amas de galaxies est aujourd'hui possible. Au fil du temps, les amas croissent par coalescence, jusqu'à épuisement de la matière à leur «portée gravitationnelle». Plus il y a de matière dans l'Univers, plus ils croissent vite et plus ils deviennent gros (voir la figure). Si l'Univers possède suffisamment de matière pour s'immobiliser, moins de dix pour cent des

amas massifs présents aujourd'hui existaient voici quatre milliards d'années – et de nouveaux amas devraient encore naître et croître aujourd'hui. En revanche, si l'Univers ne contient qu'un quart de la masse nécessaire pour arrêter son expansion (ce qui correspond aux estimations actuelles), tous les amas massifs étaient déjà formés il y a quatre milliards d'années, et aucune croissance n'a eu lieu depuis.

L'observation de la vitesse d'évolution des amas favorise la seconde hypothèse : aujourd'hui, la plupart des amas ne grossissent plus. Ainsi, l'Univers poursuivra indéfiniment son expansion (sauf s'il existe de la matière aux propriétés physiques exotiques, telle une répulsion gravitationnelle qui varie au cours du temps). D'autres mesures récentes de l'expansion cosmique, fondées sur l'observation des supernovae lointaines et sur d'autres indicateurs, corroborent cette conclusion. Bien que le dossier ne soit pas clos, l'Univers semble ouvert.



Slim Films

Un troisième amas, Abell 1795, est à une étape encore ultérieure, plusieurs milliards d'années après une fusion. Cet amas est parfaitement régulier, et sa température quasi uniforme : l'amas a assimilé tous ses groupes et a atteint un état d'équilibre. On n'observe qu'une seule région de température particulière : au centre, la température est inférieure. Pourquoi? Parce que le gaz au centre est plus dense, et qu'un gaz dense émet des rayons X avec un meilleur rendement qu'un gaz ténu : lorsque le gaz est plus dense, il y a plus d'interactions, donc plus de freinage des électrons. Or, c'est du freinage que résulte le rayonnement X. Ainsi, si rien ne vient perturber ce gaz dense pendant deux ou trois milliards d'années, il rayonne la majeure partie de son énergie initiale et se refroidit.

Lorsque le gaz se refroidit, d'importantes quantités de matériau tiède s'accumulent – suffisamment pour former une nouvelle galaxie. Où est donc passée toute cette matière? Malgré les recherches, on n'a pas trouvé les poches de gaz tièdes qui se seraient formées et qui, moins denses, tomberaient vers le centre de l'amas. Pourtant, les cartes thermométriques révèlent que l'amas est en train de se refroidir (le centre est plus froid). La perte de chaleur a-t-elle commencé trop récemment pour que les zones tièdes soient visibles? La collision de groupes de galaxies empêche-t-elle la concentration du gaz refroidi en un point? Ces flots de refroidissement constituent un autre mystère non résolu.

Les structures grossissent

Ces trois amas d'Abell correspondent probablement à des stades par lesquels passent tous les amas lors de leur croissance. De temps à autre, des groupes de galaxies se joignent aux amas ; chaque groupe apporte du gaz chaud, des galaxies brillantes et de la matière sombre. La masse supplémentaire engendre des forces gravitationnelles plus intenses, qui chauffent le gaz et accélèrent les galaxies. La plupart des astronomes pensent que presque toutes les structures cosmiques ont grossi ainsi, par coalescence. Les amas d'étoiles ont fusionné pour former les galaxies, qui s'assemblent pour créer les amas de galaxies. Dans l'avenir, les amas fusionneront à leur tour pour construire des structures encore plus grandes. L'expansion de l'Univers