

# ARTICLE DE FOND

## La vie des galaxies

Françoise Combes, Observatoire de Paris, Professeur au Collège de France

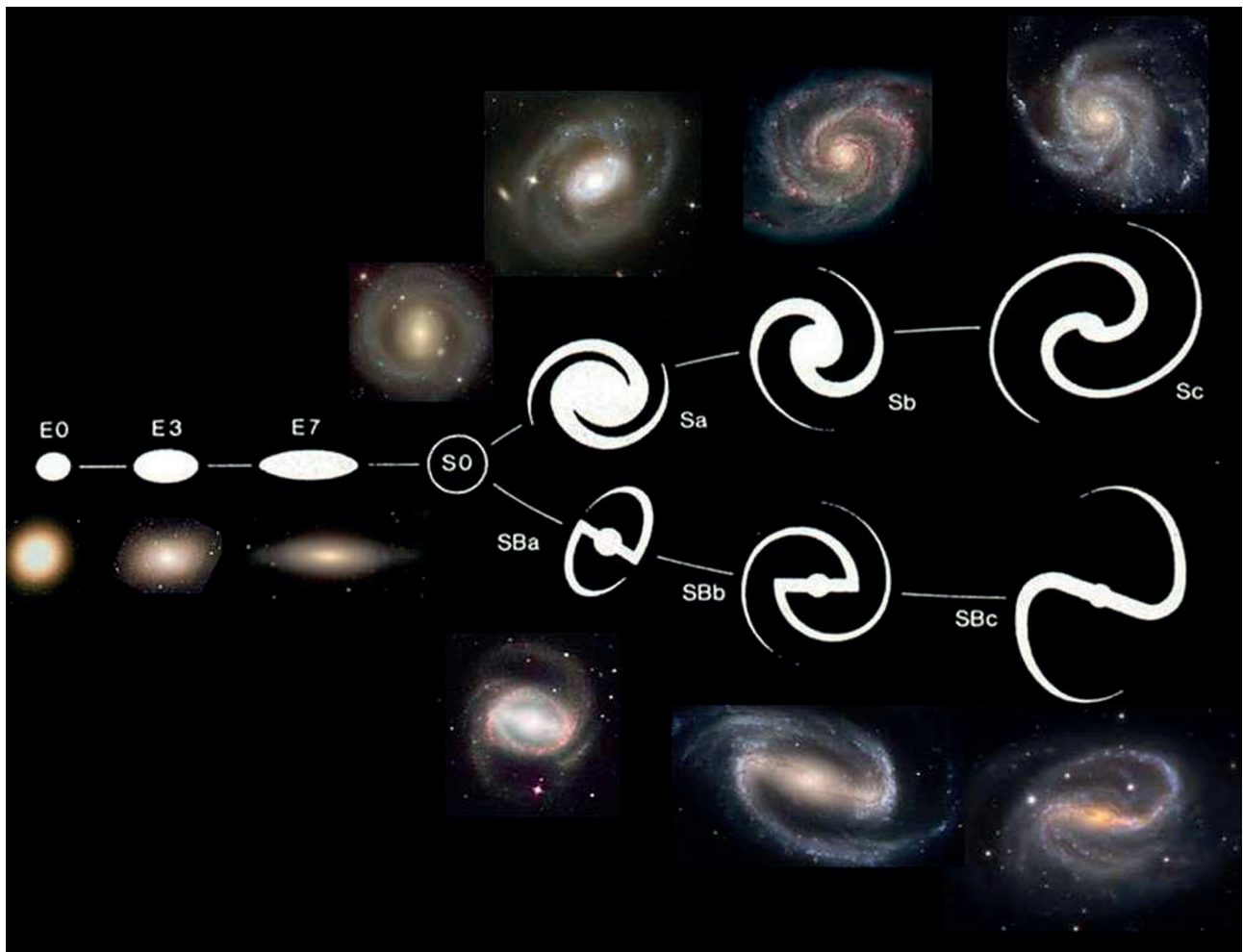
*Cet article décrit la vie tourmentée des galaxies. Celles-ci se forment par accrétion de matière dans un vaste réseau de filaments au sein de la toile cosmique et par fusion entre elles, avant de prendre leur retraite lorsqu'elles ne forment plus d'étoiles. Ce scénario est actuellement observé en direct par les télescopes les plus puissants. Restent à définir le rôle et la nature de la matière noire.*

Les galaxies se forment juste après le Big Bang, très tôt dans l'Univers, elles ont une vie tourmentée, assemblent peu à peu leur masse par accrétion ou fusion avec des galaxies voisines.

On peut dire qu'elles prennent leur retraite lorsqu'elles ne forment plus d'étoiles, et certaines la prennent très jeunes !

### De quoi sont faites les galaxies ?

Pour faire une galaxie, assemblez des étoiles (200 milliards pour la nôtre, la Voie lactée), des atomes d'hydrogène avec un peu d'hélium, une pincée de poussières, des traces d'autres éléments (C, N, O, ... Fe), et surtout beaucoup de matière noire.



**Fig. 1.** La classification de Hubble des galaxies. La plupart des galaxies sont des disques en rotation possédant des bras spiraux, comme les galaxies de droite. Il existe aussi des galaxies qui ne tournent pas (ou peu), de forme sphéroïdale, plus ou moins aplaties, que l'on appelle les elliptiques. Dans la séquence de la droite vers la gauche, le bulbe central prend de plus en plus d'importance et finit par dominer. La proportion de gaz et la formation d'étoiles diminuent aussi de droite à gauche.

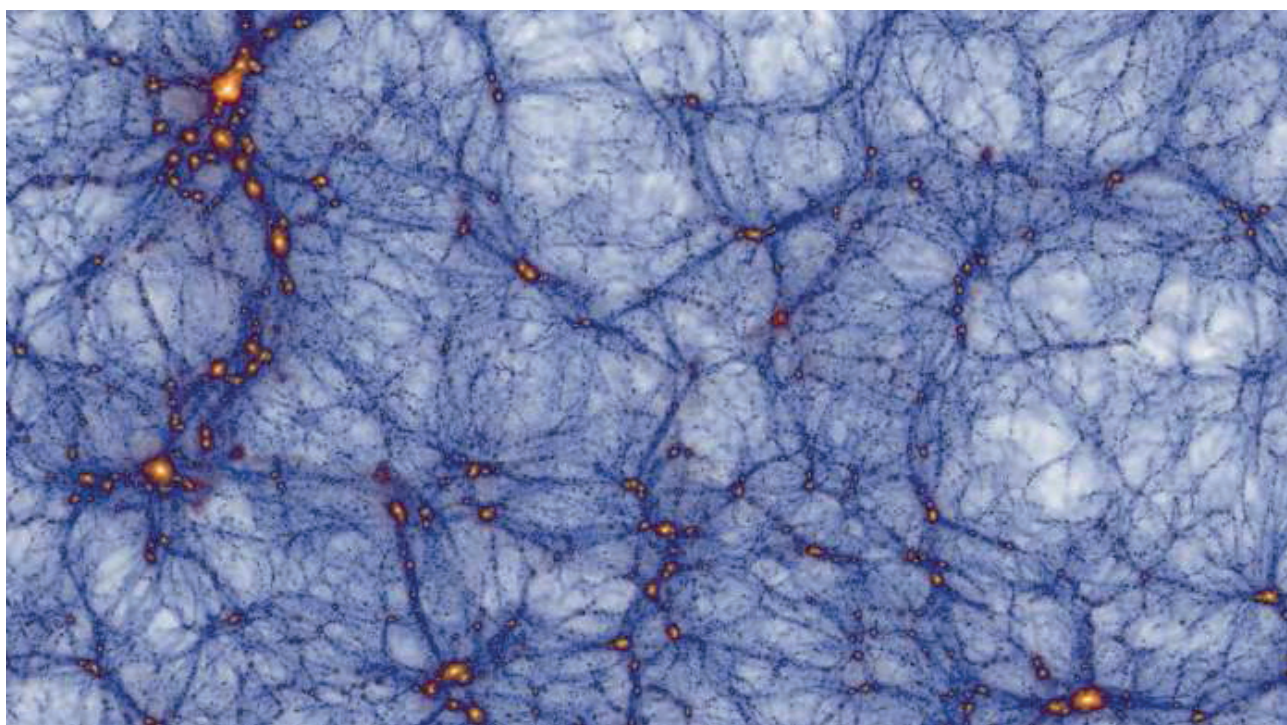
Les galaxies se révèlent avec toute une variété morphologique : des disques en rotation comme la Voie lactée, qui peuvent être très minces comme ceux que nous voyons par la tranche, des elliptiques, sphéroïdes assez lisses, sans trop de caractères mais massives, et mêmes des irrégulières, peu brillantes (cf. figure 1).

Nous vivons dans une galaxie très moyenne, une spirale du milieu de la séquence, avec seulement un petit bulbe. Elle fait 100 000 années-lumière de diamètre et possède un trou noir super-massif en son centre, comme toutes les galaxies à bulbe. Comme nous sommes à l'intérieur du plan, nous ne voyons la Voie lactée que par la tranche. Et encore, en lumière optique, notre champ de vision s'arrête très vite au bras spiral local, à cause de la poussière qui produit un écran opaque. Dans les longueurs d'onde infrarouge, beaucoup moins absorbées par la poussière, nous pouvons voir jusqu'au centre : le bulbe nous montre un effet de perspective, car il est allongé selon une barre venant vers nous, la partie proche nous apparaît plus épaisse que la partie lointaine. C'est la preuve que notre Galaxie est bien barrée, ce dont on se doutait, au vu des mouvements perturbés du gaz. En ceci, notre galaxie est très commune, puisque deux tiers des galaxies sont barrées. Les barres sont un des moteurs de l'évolution, elles permettent au

gaz d'arriver vers le centre, de former des étoiles, et d'alimenter le trou noir central.

## La naissance, l'environnement

Comment se forment les galaxies, dans quel environnement ? Les galaxies ne sont pas distribuées au hasard dans l'Univers, elles se forment dans un réseau de filaments de matière, que l'on appelle la toile cosmique (cf. figure 2). Bien que l'essentiel de la matière ne soit pas visible, les galaxies sont des traceurs de la toile, elles brillent comme des lucioles pour nous montrer la structure sous-jacente. C'est ainsi qu'ont pu être cartographiées les grandes structures qui nous entourent (amas de la Vierge, de Coma...). Nous appartenons, avec la galaxie d'Andromède, à un groupe de galaxies, le Groupe Local, lui-même appartenant à une super-structure, le super-amas local, baptisé Laniakea (immense horizon céleste, en Hawaïen). L'Univers est en expansion rapide après le Big Bang, et ce mouvement d'expansion s'oppose à l'effondrement de la matière sous l'effet de sa propre gravité. Il est très difficile de former des structures, surtout que le fond cosmique de rayonnement observé aujourd'hui en micro-onde, nous apprend que l'Univers était presque parfaitement homogène et isotrope, à  $10^{-5}$  près, quand il avait 400 000 ans.



**Fig. 2. La toile cosmique.** Cette coupe dans la simulation du Millénium montre clairement la toile cosmique des structures. Les régions jaune vif sont les groupes et amas de haute densité qui se forment à l'intersection des filaments. Il existe un navigateur interactif dans le Millennium<sup>1</sup> à l'URL [galformod.mpa-garching.mpg.de/mxlbrowser/](http://galformod.mpa-garching.mpg.de/mxlbrowser/)

<sup>1</sup> Simulation informatique qui permet de reconstituer l'évolution de l'Univers à partir du « fond diffus cosmologique ». Cette simulation porte sur environ 10 milliards de particules théoriques. Elle nécessita l'utilisation des plus gros ordinateurs existants.



Ces toutes petites fluctuations de densité n'auraient pas eu le temps de devenir des galaxies aujourd'hui, s'il n'existait pas en arrière-plan de la matière noire, insensible à la lumière, aux photons et à leur pression.

La matière noire peut former des structures qui vont devenir des « galaxies noires » et une fois que l'Univers s'est refroidi par expansion et que les atomes se sont formés par recombinaison de la matière ionisée, alors les atomes tombent dans les galaxies et commencent à former des étoiles. Au début, ce ne sont que des petites structures, de la taille de galaxies naines ou même d'amas globulaires.

Puis les galaxies croissent en masse de deux façons : d'abord elles attirent la matière des filaments cosmiques qui leur sert de cordon ombilical, puis elles fusionnent entre elles pour former des galaxies de plus en plus massives : c'est le scénario de la formation hiérarchique des galaxies. Les galaxies sont alors de moins en moins denses.

Le scénario de la naissance et de la croissance des galaxies peut aujourd'hui être observé en direct : les télescopes de plus en plus puissants peuvent regarder de plus en plus loin. Du fait de la vitesse finie de la

lumière, cela équivaut à remonter dans le temps, et aujourd'hui on voit l'Univers lorsqu'il avait 5 % de son âge actuel. Les galaxies étaient alors très jeunes et nous ont envoyé de la lumière qui n'arrive jusqu'à nous que maintenant, après 13 milliards d'années de voyage.

Les galaxies étaient plus petites et plus nombreuses autrefois. Elles étaient toutefois très brillantes, car leur taux de formation d'étoiles était 10 fois supérieur. Au départ, les galaxies sont presque entièrement formées de gaz, très instable, qui s'effondre en une myriade d'étoiles. Aujourd'hui, les galaxies spirales n'ont en moyenne que 5 à 10 % de gaz, l'ayant déjà consommé en étoiles. La plupart des étoiles qui nous entourent dans la Voie lactée sont nées dans la première moitié de l'âge de l'Univers.

### Interactions de marée entre les galaxies

La vie des galaxies n'est pas un long fleuve tranquille : durant toute leur évolution, elles se rencontrent, se collisionnent, se déforment et, après quelques centaines de millions d'années d'interactions, elles peuvent fusionner entre elles.



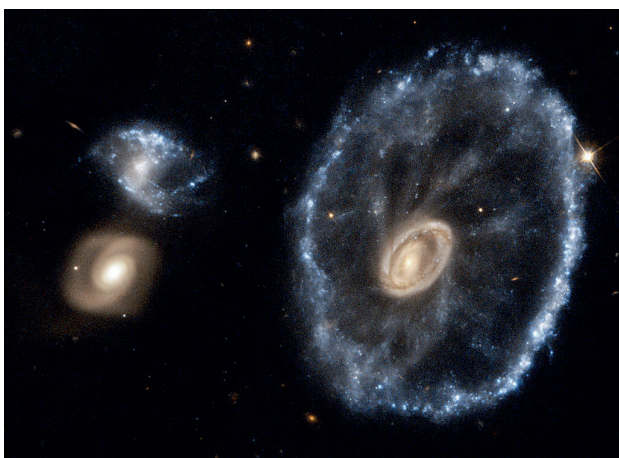
*Fig. 3. Le quintette de Stephan. Ce groupe compact de galaxies semble contenir 5 objets en interaction (d'où son nom). En fait la galaxie bleue en bas à gauche est une intruse, elle est six fois plus proche de nous. Les quatre autres, de couleur plus jaune, sont très perturbées, et des chocs dans le gaz interne au groupe peuvent se voir en rayons X, ici en bleu turquoise.*

Nous observons autour de nous de nombreuses galaxies en interaction, où des bras de marée très longs peuvent former comme les antennes d'un insecte ou des queues de souris.

La Voie lactée interagit avec ses voisins, d'abord avec les Nuages de Magellan, qui sont déformés et décentrés, avec le gaz déplacé entourant notre Galaxie comme un anneau. Nous interagissons avec la galaxie d'Andromède, qui devrait fusionner avec la Voie lactée dans 2 à 3 milliards d'années.

Mais l'environnement du Groupe Local est tout de même assez tranquille au regard de ce qui se passe dans les groupes compacts de galaxies (cf. figure 3), et plus violent encore dans les amas riches, où les galaxies sont balayées de tout leur gaz à l'entrée et transformées peu à peu en sphéroïdes, par interaction et harcèlement. Dans les amas de galaxies, ce sont les elliptiques qui dominent, des galaxies déjà en retraite, ne formant plus aucune étoile.

Les interactions de marée peuvent donner des formes très variées aux galaxies, selon la géométrie de la rencontre, selon le sens relatif de la rotation des disques des galaxies et leur mouvement orbital. Lorsqu'un compagnon arrive sur une orbite quasi polaire, il peut perdre de la matière selon cette orbite, et ainsi former un anneau perpendiculaire au disque de la galaxie principale. C'est un peu la configuration du Grand Nuage de Magellan et du courant magellanique, dans le plan polaire de la Voie lactée. Lors de la collision de plein fouet entre deux galaxies, il peut se former des anneaux, qui sont comme des ondes qui se propagent radialement dans les disques, un peu comme les rides formées par la chute d'une pierre dans un étang. Le prototype de cette collision est une galaxie appelée « Roue de Charrette » (figure 4).



*Fig.4. La galaxie dite de la Roue de Charrette photographiée par le Hubble Space Telescope. Elle est située à environ 500 millions d'années-lumière dans la constellation du Sculpteur (image ESA/Hubble & NASA).*

Notre voisine Andromède a été victime d'une telle collision de plein fouet récemment, avec un compagnon 10 fois moins massif : 2 anneaux sont observés à des rayons différents dans le gaz du disque d'Andromède. La perturbation étant moins violente, on perçoit encore la structure spirale sous-jacente, qui existait avant la collision. Alors que la Voie lactée n'a pas expérimenté de fusions majeures avec des galaxies massives au cours de la deuxième moitié de l'Univers, ce n'est pas le cas d'Andromède qui possède une multitude de courants stellaires, boucles et coquilles d'étoiles, comme de nombreux débris de toutes les interactions récentes. Tous ces débris de marée sont tellement étendus, qu'ils rejoignent la galaxie du Triangle (Messier 33), reliée à Andromède par un pont de gaz et d'étoiles, de plus de 10 rayons galactiques de longueur. Tous ces vestiges sont très précieux pour reconstruire, notamment par des simulations numériques, le passé de notre Groupe Local, et la formation de notre galaxie.

## Où sont les atomes dans l'Univers ?

Les vitesses de rotation des disques de galaxies nous montrent qu'elles sont toutes entourées d'un halo de matière invisible très massif. Les observations cosmologiques, et entre autres la nucléosynthèse primordiale des éléments dans le Big Bang, démontrent que la matière ordinaire, les atomes, ne peut constituer que 5 % du contenu total de l'Univers (cf. figure 5). Parmi la matière totale, les atomes représentent environ 17 % au niveau global. Ceci est établi par une concordance d'expériences allant des fluctuations de température dans le fond cosmique micro-onde, des lentilles gravitationnelles et des supernovae Ia comme chandelles standard. Mais lorsque l'on mesure cette fraction au niveau des galaxies par les vitesses de rotation, on est loin du compte ! Les atomes ne représentent jamais plus de 3 % environ, et même moins pour les galaxies les moins massives. La fraction de matière ordinaire est maximum pour les galaxies de masse semblable à celle de la Voie lactée (3 %), mais ensuite cette fraction diminue pour les galaxies plus massives ou moins massives que la nôtre. Où est donc passée la matière ordinaire dans l'Univers ? La majorité n'est pas dans les galaxies, mais sans doute dans les filaments de la toile cosmique. Associée à la matière noire des filaments, elle se trouve dans un état si dilué qu'il est difficile de la détecter, soit sous forme de gaz chaud, soit sous forme de gaz plus froid. Un problème non résolu est de savoir pourquoi la matière ordinaire a été chassée des galaxies, car certainement juste après

le Big Bang, les premières structures devaient avoir la composition générale globale de l'Univers.

La solution du problème pour les galaxies naines pourrait se trouver dans la rétroaction due à la formation d'étoiles : l'énergie fournie par l'explosion des supernovae, les vents stellaires peut donner au gaz interstellaire des vitesses de l'ordre de 100 km/s, suffisantes pour quitter la galaxie. Par contre en ce qui concerne les galaxies massives, leur puits de potentiel gravitationnel est trop profond, et la vitesse d'échappement est bien plus grande que 100 km/s, l'énergie de la formation d'étoiles ne suffit pas à éjecter le gaz en dehors des galaxies. C'est là que le trou noir super-massif au centre de chaque galaxie pourrait avoir son importance !

L'énergie gravitationnelle libérée par la matière tombant sur le trou noir est phénoménale. Le rendement énergétique est bien supérieur à celui de l'énergie nucléaire de fusion dans les étoiles ! Il est possible de calculer toute l'énergie qui a été libérée par la croissance du trou noir pour obtenir sa masse actuelle, c'est environ 80 fois l'énergie de liaison de la galaxie toute entière. Si l'énergie dégagée par le trou noir était entièrement absorbée par la galaxie, celle-ci serait détruite. Heureusement pratiquement toute l'énergie est rayonnée, ou sort par des jets de matière dans l'espace inter-galactique. Une petite partie de cette énergie pourrait tout de même servir à éjecter une grande partie du gaz des galaxies. Les

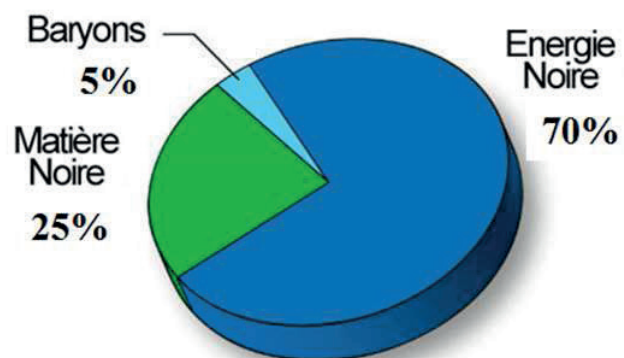
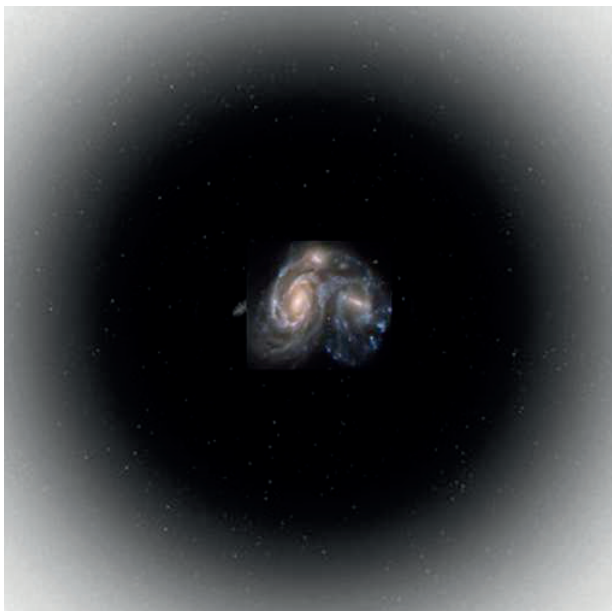
astronomes essaient d'éclaircir ce problème par des simulations et des observations plus poussées.

## Une vie de galaxie

Nous connaissons beaucoup mieux aujourd'hui la vie des galaxies : les premières d'entre elles naissent 500 millions d'années après le Big Bang. Elles sont petites et compactes, et constituées en grande partie de gaz et de matière noire. Mais elles continuent à se former et à évoluer, et il s'en forme encore aujourd'hui ! Les petites galaxies accroissent leur masse, par accréation de matière à partir des filaments cosmiques, et elles interagissent et fusionnent entre elles pour donner de plus grosses galaxies.

Tant qu'elles possèdent du gaz interstellaire, les galaxies sont vivantes et continuent de former des étoiles. En fin de chaîne de fusion, il se forme des galaxies elliptiques massives qui ont épuisé tout leur gaz et ne forment plus d'étoiles, ce sont des galaxies mortes.

Bien sûr, il existe encore des problèmes non résolus dans la formation et l'évolution des galaxies, nous ne comprenons pas pourquoi des galaxies stoppent brutalement leur formation d'étoiles et partent à la retraite très jeunes, et quel est le rôle et la nature de la matière noire.



**Fig. 5.** La matière noire dans l'Univers. Les galaxies sont entourées d'un halo de matière noire, qui se révèle uniquement par la force gravitationnelle qu'il exerce sur les étoiles et le gaz (à gauche). Le camembert de droite résume notre connaissance du contenu de l'Univers : les atomes bien connus (ou baryons) ne représentent que 17 % de la matière totale. Pourtant dans les galaxies, les baryons ne sont jamais plus que 3 % du total, et souvent moins.