

# Des vagues dans la mare galactique

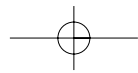
*Bien plus que d'élégants motifs décoratifs, les spirales et les barres qui ornent les galaxies sont essentielles à leur croissance et leur développement.*

Françoise Combes



M.S.A. European Space Agency, Steven Beckwith Space Telescope Science Institute and Hubble Heritage Team

**1. Les galaxies spirales** sont parmi les plus beaux objets sur le ciel nocturne. La plupart, comme la galaxie NGC 1097 (ci-dessus), possèdent une structure rectangulaire centrale, une barre d'étoiles. D'autres, comme M51 (page ci-contre) n'en possèdent pas. Les barres et les bras des galaxies spirales correspondent à des régions relativement denses en étoile, en poussière et en gaz. L'origine de ces structures reste mal comprise.

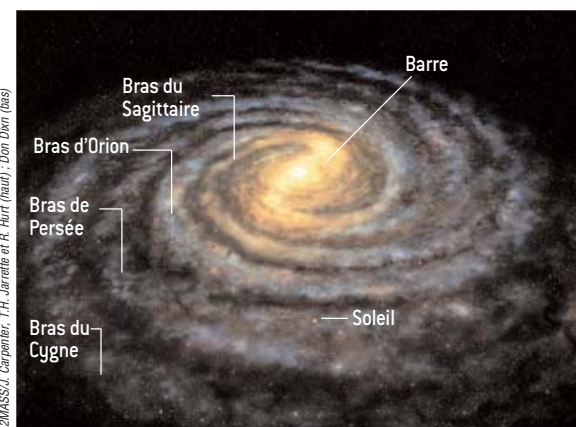




**D**'élégantes spirales qui constellent la voûte céleste... Les galaxies sont parmi les plus élégants objets de l'astronomie. La galaxie *Messier 51* en est un des plus beaux exemples : nommée par le passé « galaxie tourbillon », elle ressemble à un cyclone géant. Les étoiles les plus brillantes s'y regroupent comme des perles sur un collier qui se déroule autour d'un joyau central d'étoiles. Entremêlées dans ces bras, des bandes de poussière sombre trahissent la présence du gaz interstellaire à partir duquel les étoiles sont nées. Pour *Messier 51* comme pour de nombreuses autres galaxies, le motif en spirale se déploie à partir du centre, mais la plupart des spirales galactiques commencent aux extrémités d'une lumineuse barre d'étoiles.

Notre galaxie, la Voie lactée, est souvent décrite comme une spirale pure, mais les astronomes savent aujourd'hui qu'il s'agit d'une spirale barrée. Les indices ont commencé à s'accumuler depuis 1975 : les étoiles et le gaz du centre de la galaxie ne suivent pas les orbites attendues si la spirale s'étendait jusqu'au cœur galactique. Des relevés récents du ciel dans l'infrarouge proche, qui pénètre au travers des nuages de poussière qui bouchent la vue du cœur galactique, ont révélé directement la barre centrale, dissipant les derniers doutes. Les dernières observations font ainsi état de la présence d'une barre d'environ 25 000 années lumière de longueur.

Les barres et les spirales des galaxies semblent être des structures persistantes et immuables, mais il n'en est rien. Ce sont des motifs qui évoluent, mais si lentement que nous n'en percevons qu'une image figée à un moment particulier. Les spirales et les barres sont des ondes qui balayent



**2. La Voie lactée possède une barre centrale**, alors que les astronomes pensaient jusqu'à récemment que c'était une spirale pure. Vue horizontalement en infrarouge proche (seule longueur d'onde à percer la poussière du centre galactique) par le relevé 2MASS (en haut), la galaxie apparaît plus épaisse qu'attendue, et son cœur est plus large et plus grand à gauche qu'à droite. Ces deux caractéristiques trahissent une barre orientée à 45 degrés par rapport à la direction du centre, comme représenté dans la vision d'artiste ci-dessus.

les disques des galaxies en redistribuant violemment les étoiles, la poussière et le gaz qui les composent.

Les astronomes ont réalisé cette dernière décennie que des propriétés en apparence immuables des galaxies, comme leur forme, évoluent en fait spectaculairement avec le temps. Le cannibalisme galactique est le processus le plus connu qui transforme l'apparence des galaxies : la fusion avec une voisine peut transformer une galaxie spirale calme et bien ordonnée en une galaxie elliptique désordonnée et bouillonnante d'activité stellaire. Les astronomes commencent à cependant à réaliser que les processus ondulatoires sont peut-être encore plus importants dans l'évolution de la forme des galaxies.

## Des embouteillages d'étoiles

Toutes les galaxies spirales, avec ou sans barre, tournent. Les étoiles gravitent autour du centre en formant un motif régulier. Pour autant, elles ne tournent pas à l'unisson. Dans la Voie lactée, les étoiles les plus proches du centre ont bouclé des milliers de révolutions au cours des cinq derniers milliards d'années, alors que le Soleil, situé environ à mi-distance du rayon galactique, n'a fait le tour de la galaxie qu'une vingtaine de fois dans le même temps. Cette décroissance de la vitesse de révolution du centre vers le bord du disque galactique implique que les barres et les spirales ne peuvent être des structures rigides, sinon elles s'enrouleraient rapidement autour du centre comme une corde s'enroule autour d'un winch.

Comment les bras spiraux conservent-ils alors leur forme ? Dans les années 1960, Chia-Chiao Lin et Frank Shu, alors à l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT) ont proposé la théorie dite des ondes de densité. Selon cette théorie, les barres et les bras de spirales sont les « bosses » d'ondes de densité, où les étoiles s'accumulent de façon temporaire comme dans un embouteillage cosmique. Dans la partie interne de la galaxie, les étoiles effectuent leurs révolutions plus rapidement que l'onde et la rattrapent, alors que dans les régions extérieures, elles se déplacent plus lentement, et l'onde les percute par l'arrière. La frontière des deux zones, où l'onde accompagne les étoiles à la même vitesse, est nommée cercle de corotation.

L'onde spirale en elle-même résulte de l'alignement des orbites stellaires. L'orbite d'une étoile dans une galaxie n'est pas aussi régulière que celles des planètes autour du Soleil, car la répartition de masse d'une galaxie ne peut être assimilée à une masse ponctuelle. Bien que la plupart des galaxies abritent en leur cœur un trou noir supermassif, il ne représente qu'une fraction ténue de la masse totale, distribuée plus uniformément dans une zone centrale étendue. Cela force les étoiles à décrire des ellipses qui ne se ferment pas sur elles-mêmes mais qui se décalent fortement à chaque tour et oscillent radialement, formant des rosettes (voir l'encadré page 5). La vitesse de décalage – ou taux de précession – de l'orbite du Soleil est ainsi de 105 degrés à chaque révolution, soit tous les 230 millions d'années. L'ellipse solaire décrit un tour complet tous les 790 millions d'années.

Quand les taux de précession des orbites stellaires sont notablement différents, la galaxie ne présente pas de

structure d'onde spirale. Les étoiles passent aléatoirement au voisinage l'une de l'autre et s'éloignent rapidement, formant des regroupements fugaces à l'instar des voitures sur une autoroute lorsque la circulation est fluide. En revanche, lorsque la majorité des ellipses orbitales tournent au même taux, une onde voit le jour. Dans une barre, les ellipses sont alignées et tournent de concert, ce qui produit une surdensité le long de leur grand axe. Dans une onde spirale, les orbites sont régulièrement décalées, si bien que la zone de surdensité dessine une spirale.

En bref, les orbites stellaires peuvent se déplacer à l'unisson même si les étoiles elles-mêmes ne le font pas. Mais qu'est ce qui oblige les ellipses à se décaler ensemble ? C'est le résultat d'une instabilité gravitationnelle. Le champ de gravité d'une galaxie n'est pas donné par une force externe fixée, mais provient des étoiles elles-mêmes. Une onde commence à se former quand des orbites stellaires s'alignent par hasard. Le renforcement des interactions gravitationnelles dues à la proximité des étoiles modifie le taux de précession des ellipses. Les plus rapides ralentissent et les plus lentes accélèrent jusqu'à se synchroniser. L'onde de densité s'auto-amplifie ainsi.

Quand une étoile pénètre dans la zone de surdensité de l'onde, elle y est temporairement piégée par la gravité, après un laps de temps, elle est libérée et s'échappe de l'onde. Des étoiles arrivant par l'autre côté de l'onde garantissent la persistance de la structure.

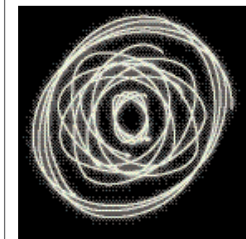
## Le gaz aussi est dans la vague

Outre le cercle de corotation, il existe deux autres lieux particuliers dans le disque galactique, l'un à l'intérieur de ce cercle, l'autre à l'extérieur, nommés résonances de Lindblad, du nom de l'astronome suédois Bertil Lindblad. Les étoiles dont l'orbite coïncide avec ces résonances présentent une certaine synchronisation avec l'onde de densité : la précession de leurs orbites est dans un rapport entier avec la période de l'onde. Cette cohérence renforce au fil des passages la contrainte exercée par l'onde sur ces étoiles. Les résonances de Lindblad, et d'autres, influent sur la conformation des orbites stellaires et jouent le rôle de frontières ou d'interfaces qui délimitent l'extension des ondes de densité.

La théorie des ondes de densité explique comment la barre et les bras spiraux persistent, mais peu après que Lin et Shu l'ont proposée, elle a rencontré des problèmes. Alar Toomre, du MIT, a noté que les ondes de densité perdent de l'énergie en provoquant des ondes de choc dans le milieu interstellaire. Quelque chose doit donc les régénérer. Le mécanisme initialement proposé mettait en jeu des propagations d'ondes plus complexes. Au lieu d'une seule onde, des ondes multiples, créées par des instabilités gravitationnelles locales, se propageraient vers l'intérieur et l'extérieur. Le cercle de corotation agirait comme un miroir semi-réfléchissant qui peut soit défléchir soit transmettre ces ondes, leur permettant de gagner de l'énergie aux dépens de l'énergie de rotation de la galaxie. Les ondes seraient amplifiées en se propageant au travers de la région délimitée par les résonances de Lindblad, comme

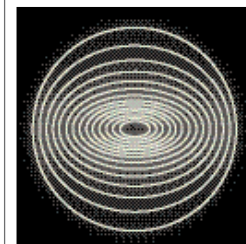
## Mettre de l'ordre dans les orbites

On pense que les barres et les spirales sont des ondes parcourant le disque galactique. Quand le front d'onde atteint une région donnée, les étoiles se rapprochent les unes des autres ; quand l'onde quitte cette région, elles se séparent à nouveau. L'onde ne rapproche pas directement les étoiles les unes des autres mais imprime plutôt une chorégraphie subtile à leurs orbites.



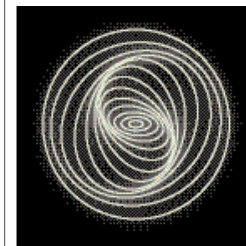
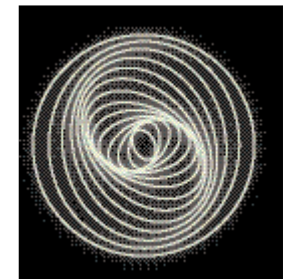
Les trajectoires des étoiles dans le champ gravitationnel complexe de la galaxie forment des rosettes. Une étoile se déplace le long d'une ellipse, mais dans le même temps, celle-ci se décale, si bien que quand l'étoile a complété une orbite, elle ne se retrouve pas à son point de départ. Ce décalage des ellipses est l'élément de base des ondes de densité galactiques.

Quand les orbites sont agencées aléatoirement, aucun mouvement ondulatoire ne se produit (Par simplicité, cette figure et les suivantes ne représentent que des orbites fermées dans un repère tournant).



Une onde barrée apparaît quand les orbites s'alignent. Les interactions gravitationnelles conduisent les ellipses à se déplacer à l'unisson, en maintenant l'alignement. La densité d'étoiles est plus élevée le long de l'axe principal des ellipses.

Une onde spirale apparaît lorsque les ellipses se déplacent de concert tout en étant progressivement décalées l'une par rapport à la suivante. La densité d'étoiles est plus élevée là où les ellipses se superposent.



Les galaxies spirales barrées correspondent à la situation où les orbites centrales sont alignées tandis que celles plus extérieures sont décalées.

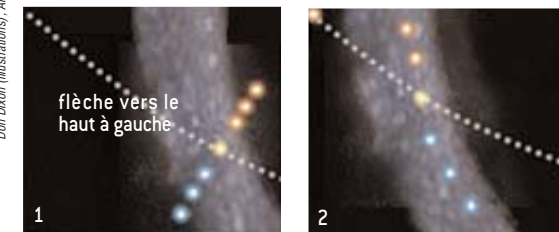
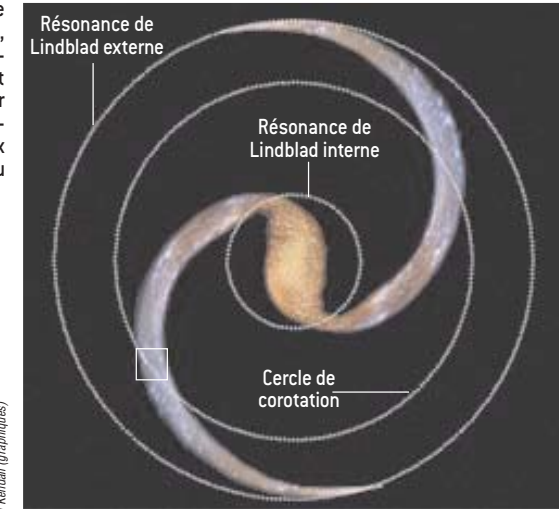
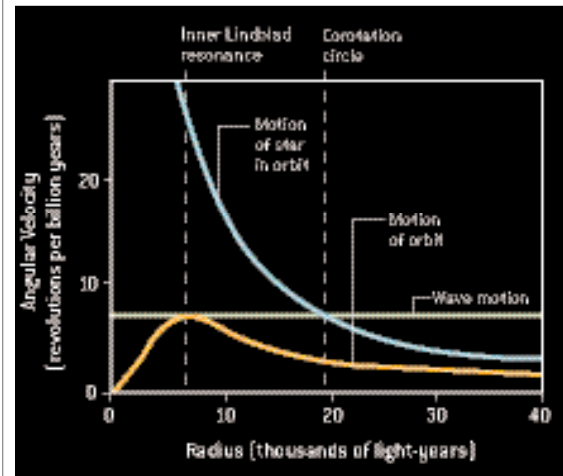
Alison Kendall

## Anatomie d'une vague

La beauté éthere des galaxies spirales semble bien loin des tracas concrets des embouteillages. Les deux situations sont pourtant similaires. Les bras spiraux sont le lieu où, en raison de la syn-

chronisation des orbites, les étoiles s'accumulent temporairement. Ils avancent indépendamment du mouvement propre des étoiles, comme le déplacement d'un bouchon diffère de celui des voitures

LES BRAS SPIRAUX observés par les astronomes sont des images instantanées d'ondes en mouvement. Dans la représentation ci-contre, l'onde et les étoiles se déplacent dans le sens des aiguilles d'une montre, mais à des vitesses différentes. Les étoiles des régions centrales tournent plus vite que l'onde, elles la rattrapent, intègrent la vague durant un temps, puis la quittent. Les étoiles de la périphérie sont rejointes par l'onde, incorporées, puis laissées à la traîne [zoams 1 et 2]. La frontière entre ces deux zones est le cercle de corotation. Les bras spiraux sont délimités par deux autres cercles, les résonances de Lindblad, où les étoiles et l'onde sont en phase dans un certain sens.



1 L'onde de densité tourne dans le sens des aiguilles d'une montre, comme les étoiles.  
2 Les étoiles intérieures (orange) avancent plus vite que l'onde, tandis que les étoiles extérieures (bleues) tournent moins vite.

La vitesse angulaire d'une onde de densité est constante du centre vers le bord de la galaxie, alors que celle des étoiles chute avec la distance au centre. Les vitesses sont égales sur le cercle dit de corotation. Les orbites stellaires elles-mêmes tournent. Les rayons où la vitesse de précession des orbites est un multiple de celle de l'onde de densité sont nommés résonances de Lindblad (une seule est représentée ici).

dans une chambre résonante cosmique.

Ce mécanisme de réflexion et d'amplification des ondes représentait une hypothèse plausible, mais les équations étaient trop complexes pour être résolues sauf au prix d'approximations sévères. Les astronomes ont mis en œuvre des simulations numériques délicates. Les premiers résultats suggéraient que les ondes supplémentaires, au lieu de préserver la structure spirale, en accélèrent la destruction. Une spirale se développe dans un premier temps, mais se dissipe rapidement, en laissant place une barre. Les théoriciens ne parvenaient pas à éviter la formation d'une barre, ce qui contredisait manifestement les observations.

Cet obstacle a disparu dans les années 1980 et 1990 quand mes collègues et moi avons eu l'idée d'inclure un nouvel ingrédient dans les simulations : le gaz. Le gaz ne constituant que quelques centièmes de la masse des galaxies spirales, les modélisateurs l'avaient négligé dans les simulations. Il a néanmoins un rôle dynamique démesuré. Les nuages de gaz interstellaire subissent souvent des collisions et dissipent leur énergie cinétique en déformation et en rayonnement.

Ainsi ralentis, les nuages sont plus sensibles aux instabilités ondulatoires. Les étoiles, en revanche, se rencontrent

très rarement et préservent par conséquent une plus large gamme de vitesses relatives. Elles opposent ainsi une résistance plus importante au passage des ondes.

En prenant en compte le gaz, les simulations reproduisent une grande variété de morphologie galactique. Les barres d'étoiles jouent le rôle d'agitateur, en entraînant continuellement la structure spirale du gaz, et la spirale est persistante. De plus, le fait que les ondes englobent le gaz résout plusieurs problèmes récurrents en astronomie galactique.

Pour commencer, ces ondes expliquent la présence de bandes de poussières sur le bord avant des bras spiraux. En raison des collisions, le gaz, mélangé à de la poussière, n'est pas en phase avec les étoiles. Il perd de l'énergie orbitale et tombe vers le centre. Les orbites plus basses tournant plus vite, le gaz court ainsi devant les étoiles dans les bras spiraux (voir l'encadré page 07).

Par ailleurs, cette dissipation de l'énergie provoque la chute du gaz jusque dans la région centrale en quelques rotations de la barre, une durée de l'ordre d'un milliard d'années. Là, de nouvelles étoiles se forment à partir du gaz. Ainsi, les ondes de densité expliquent que le taux de formation stellaire reste élevé dans le centre des galaxies.

Elles pourraient aussi être la clé du mystère de l'alimentation des trous noirs centraux. La matière ne se déverse pas dans un trou noir aussi facilement que ce que l'on imagine. Bien que l'énergie gravitationnelle potentielle d'une galaxie tende à être minimisée, et par conséquent la masse à s'accumuler au centre, la force centrifuge tend à contrebalancer la gravité. Pour que la matière tombe effectivement vers le trou noir central, le principe de conservation du moment angulaire impose qu'une fraction du moment angulaire de la galaxie soit transférée vers l'extérieur par un mécanisme à l'échelle galactique. Les barres et les bras spiraux joueraient précisément ce rôle.

Les astronomes ont observé que le gaz tombe sur les trous noirs par bouffées. Les ondes expliqueraient cette alimentation en deux étapes. D'abord, alors que le gaz tombe, il atteint une résonance où il est en phase avec la barre, et par conséquent peu sensible au couple qu'elle exerce. Le gaz s'accumule alors en un anneau circulaire et donne naissance à des étoiles. Le gaz et les étoiles de cet anneau forment ensuite à leur tour une onde barrée locale, qui dépose du gaz dans le trou noir. Dans notre galaxie, on soupçonne l'existence d'une telle « mini-barre » imbriquée dans la barre centrale, et qui tourne beaucoup plus rapidement. Les ondes de densité ne forment donc pas seulement des motifs décoratifs : elles permettent aux galaxies de croître.

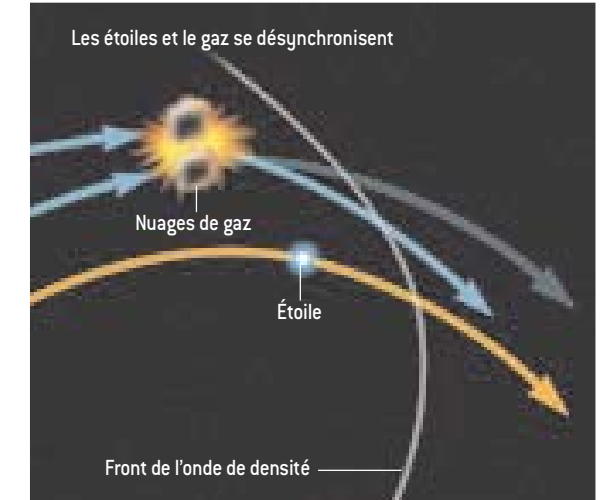
## Grandeur et décadence des barres

Dans les simulations tridimensionnelles, nous avons découvert un phénomène presque systématique. Non seulement la barre centrale tire la matière dans le plan du disque galactique, mais elle l'élève aussi hors du disque. Une étoile peut entrer en résonance avec l'onde barrée de telle sorte que les oscillations verticales de sa trajectoire coïncident avec les rencontres avec la barre. L'onde amplifie alors ces oscillations, si bien que dans les simulations, le disque galactique s'épaissit considérablement dans les régions jouxtant les résonances, ce qui donne aux régions internes des galaxies une forme de cacahuète. Ces découvertes expliqueraient les formes bizarres observées dans les galaxies depuis plus d'une dizaine d'années.

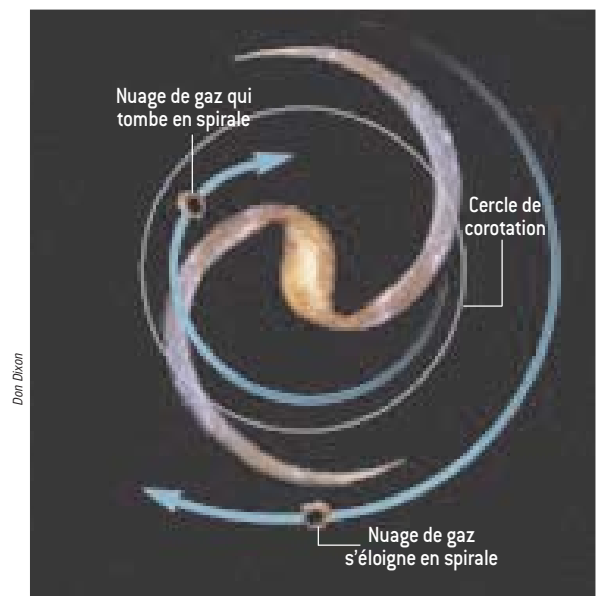
Ironie du sort, en drainant la matière vers le cœur de la galaxie, la barre centrale peut se détruire elle-même. La masse qui s'accumule au centre défléchit les étoiles et les empêche de suivre les orbites régulières imposées par la barre. Cette structure barrée qui semblait trop robuste quand seule la composante stellaire était prise en compte se révèle fragile dès que l'on prend en compte le gaz. Cependant, si ce mécanisme s'avère correct, comment rendre compte de la multitude de galaxies barrées observées ? En lumière visible, deux tiers des galaxies présentent une barre, et un relevé en infrarouge proche de 2002 a porté cette estimation à trois quarts. La conclusion la plus plausible est que la barre se forme, se détruit et se reforme dans un cycle continu.

La formation d'une nouvelle barre est un véritable défi. La galaxie doit sortir radicalement des conditions qui ont permis la destruction de la barre précédente. En particulier, les orbites stellaires doivent se repositionner selon

un motif régulier avec une faible vitesse angulaire relative. Une façon d'arriver à ce résultat est que la galaxie accrete une grande quantité de gaz intergalactique. En tombant, les nuages de gaz entrent en collision, perdent de l'énergie et leur orbite se régularise. Leur moment angulaire élevé ralentit leur chute, ce qui favorise l'instabilité du disque et donc laisse à la barre la possibilité de se réassembler. La quantité de gaz nécessaire est colossale : pour reformer une barre, une galaxie typique doit doubler sa masse en dix milliards d'années. Les astronomes savent aujourd'hui que l'espace intergalactique contient des réservoirs



**3. Comme les étoiles, le gaz participe à l'onde spirale.** Contrairement aux étoiles, cependant, les nuages de gaz s'entrechoquent et dissipent de l'énergie, si bien qu'ils tombent sur des orbites plus basses (ci-dessus). Les étoiles, elles, restent sur une orbite stable. En conséquence, le gaz et les étoiles ne sont pas synchronisés par les ondes de densité. Cette désynchronisation engendre un couple de torsion sur les nuages de gaz. Un nuage situé à l'intérieur du cercle de corotation se déplace plus vite que les étoiles de la barre centrale, et donc leur attraction gravitationnelle le freine, le faisant tomber en spirale vers le centre (ci-dessous). Inversement, un nuage situé au-delà de ce cercle est tiré en avant sur son orbite, ce qui augmente son énergie orbitale et son moment angulaire l'amène par conséquent sur une orbite plus large.





de gaz suffisant pour cela.

Pour mettre ce modèle à l'épreuve, il faut regarder vers le passé. Le télescope spatial Hubble est suffisamment puissant pour discerner la forme des galaxies des générations précédentes. La première étude dans ce sens, conduite entre 1998 et 2002 par l'équipe de Sidney van den Berg, de

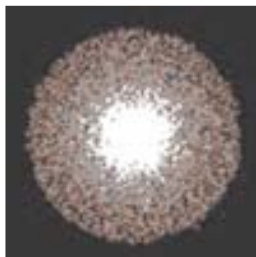
l'Institut d'astrophysique de Victoria en Colombie-Britannique, a d'abord mené à la conclusion que les barres étaient beaucoup plus rares par le passé. Ce résultat surprenant a fait peser des doutes sur le modèle de l'accrétion du gaz mais aussi sur toute la théorie des ondes spirales. En effet, les galaxies précoces étaient plus riches en gaz et

## Quand les galaxies se régénèrent

Les astronomes supposaient autrefois que les barres et les spirales étaient permanentes, mais ils pensent désormais que ces motifs disparaissent et se régénèrent. Les processus gravita-

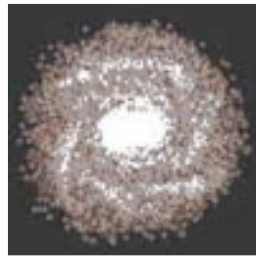
tionnels qui entraînent la formation d'une barre finissent par la détruire, avant de créer à nouveau à l'aide de quantités colossales de gaz frais, comme le suggèrent les simulations.

Naissance



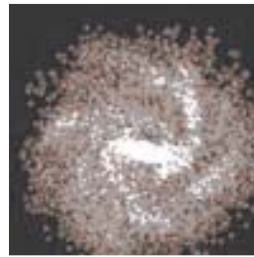
La galaxie naît sous la forme d'un disque amorphe d'étoiles, de gaz et de poussières.

2 milliards d'années



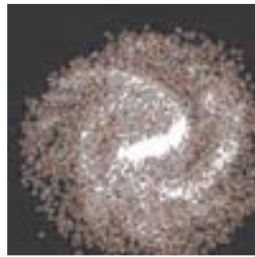
La barre et les ondes spirales se développent. Du gaz intergalactique tombe sur le disque et va doubler sa masse en 6,5 milliards d'années.

5 milliards d'années



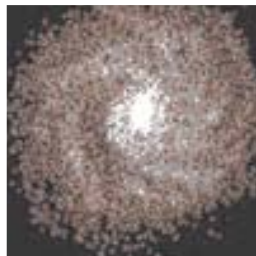
L'onde se renforce. La barre balaye le gaz proche du cœur mais maintient le gaz intergalactique à distance.

8 milliards d'années



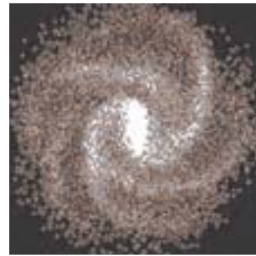
Le gaz s'accumule dans le cœur commence à déchirer la barre.

11 milliards d'années



La barre a disparu. N'étant plus retenu, le gaz intergalactique qui était en attente dans les parties externes du disque se déverse sur le cœur.

14 milliards d'années



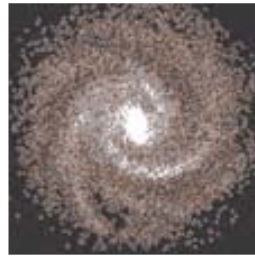
Une nouvelle barre se forme. L'accrétion du gaz est cruciale : dans les simulations sans accrétion, la barre ne revient jamais.

17 milliards d'années



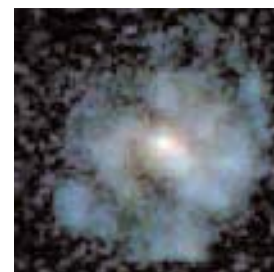
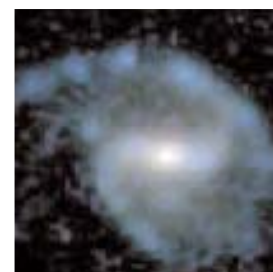
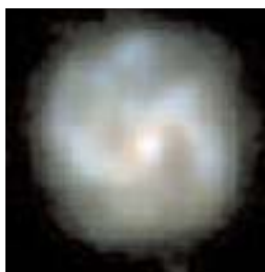
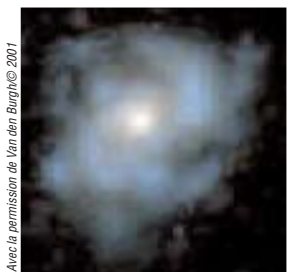
Comme auparavant, la deuxième barre commence à faiblir.

20 milliards d'années



La barre a presque disparu. Selon les conditions, la barre se reforme et disparaît plus ou moins rapidement.

Alison Kendall



**4. Les galaxies distantes présentent les mêmes motifs** (barres et spirales) que leurs jeunes parentes. Comme elles témoignent d'une époque précoce de l'histoire cosmique, cela corrobore l'ori-

gine ondulatoire de ces structures. Ces galaxies sont tellement éloignées que leur architecture est difficile à discerner, ce qui explique que l'on a d'abord cru que les spirales étaient rares par le passé.

moins concentrées qu'aujourd'hui, et donc les barres devraient être plus fréquentes. Les résultats préliminaires de van den Bergh ont cependant été récemment expliqués en termes de biais observationnels : les barres sont plus difficiles à identifier dans des galaxies distantes. Après correction, il apparaît qu'elles étaient aussi répandues dans le passé qu'elles ne le sont aujourd'hui, ce qui suggère qu'elles sont détruites et reconstruites à un taux constant.

En d'autres termes, les galaxies spirales ne naissent pas avec une forme donnée, barrée ou non barrée. Elles se métamorphosent. Si les trois quarts des galaxies sont barrées, une galaxie doit posséder une barre les trois quarts de sa vie. Durant ces périodes, la barre empêche du gaz frais de ravitailler le centre de la galaxie. Le gaz s'accumule à la périphérie et, après dissolution de la barre, se déverse au centre et rejaunit la galaxie.

Une autre façon de gagner rapidement de la masse, pour une galaxie, est le cannibalisme, c'est-à-dire la fusion successive avec plusieurs galaxies. Ce processus est néanmoins destructeur. Une fusion de grande ampleur détruit le disque et accouche d'une galaxie elliptique, or seule une minorité de galaxies sont elliptiques. À l'inverse, une accrétion douce à partir du milieu intergalactique permet aux galaxies de croître en conservant leur forme. Les ondes de densité redistribuent la matière ingurgitée et empêchent la galaxie de lentement se tasser. Grâce à elles, les galaxies sont bien vivantes.

### Auteur & Bibliographie

**Françoise COMBES** est astronome à l'Observatoire de Paris et Présidente du Comité national français d'astronomie.

William H. WALLER, *Redesigning the Milky Way*, in *Sky and Telescope*, vol. 108, n° 3, pp. 50-56, septembre 2004.

F. COMBES, *Secular Evolution versus Hierarchical Merging*, in *Penetrating Bars through Masks of Cosmic Dust*, Springer, 2004. Astroph/0406306.

F. BOURNAUD et F. COMBES, *Gas Accretion on Spiral Galaxies: Bar Formation and Renewal*, in *Astronomy & Astrophysics*, vol. 392, n° 1, pp. 83-102, septembre 2002. Preprint : arxiv.org/abs/astro-ph0206273.

R. BUTA et F. COMBES, *Galactic Rings*, in *Fundamentals of Cosmic Physics*, vol. 17, pp. 95-281, 1996.