# L'Astronomie dans le monde

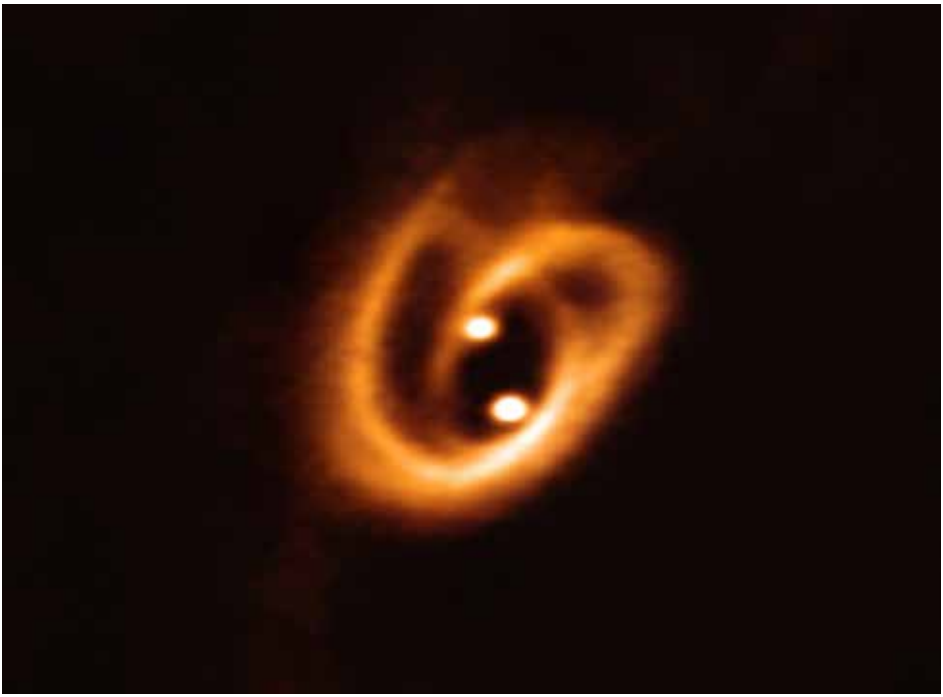
## *Un bretzel cosmique*

*Basé sur un communiqué ESO*

Grâce au réseau ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) les astronomes ont obtenu une image à très haute résolution des disques entourant la protoétoile double [BHB2007] 11 – le plus jeune membre d'un petit amas stellaire de la nébuleuse obscure Barnard 59, elle-même partie de la nébuleuse obscure de la Pipe. Des observations antérieures de ce système binaire en avaient dévoilé la structure externe : le disque circumbinaire. À présent, sa structure interne nous apparaît grâce aux clichés plus fins d'ALMA.

Deux sources compactes sont visibles sur l'image de la page 600 – probablement les disques ou anneaux circumstellaires entourant chacune des deux jeunes étoiles. Pour croître, les étoiles accrètent la matière de ces disques. La taille de chacun d'eux est comparable à celle de la ceinture d'astéroïdes du Système

***Barnard 59, siège de la proto-binaire [BHB2007] 11, fait partie d'un vaste nuage sombre de poussière interstellaire appelé la nébuleuse de la Pipe. Cette nouvelle image très détaillée a été réalisée avec la caméra WFI (Wide Field Imager) du télescope MPG/ESO de 2,2 mètres à l'observatoire de la Silla de l'ESO. (ESO)***



***ALMA a capturé cette image de deux disques de gaz et de poussières entourant deux jeunes étoiles et alimentant leur croissance. (ALMA/ESO/NAOJ/NRAO, Alves et al.)***

solaire et la distance les séparant est de 28 fois la distance Terre – Soleil.

Les disques circumpolaires sont entourés d'un disque de dimensions supérieures. La masse totale de l'ensemble équivaut à quelque 80 masses jupitériennes. Le tout ressemble à un réseau complexe de nuages de poussière affectant une structure en spirale, un peu comme un bretzel.

Ce résultat est particulièrement important pour les modèles de formation stellaire. Il s'agit de la première image de la structure complexe d'un jeune système binaire. On découvre en particulier les filaments nourriciers qui relient chaque étoile au disque d'où elles sont nées.

Les protoétoiles accrètent la matière du disque circumbinaire en deux étapes. La première étape consiste à transférer de la masse à chacun des disques circumstellaires au travers des jolies boucles que montre l'image prise par ALMA. L'analyse des données révèle par ailleurs que le disque circumstellaire le moins massif mais le plus brillant – celui figurant dans la partie inférieure de l'image – reçoit davantage de matière. Dans un second temps, chaque étoile accrète la matière depuis son disque circumstellaire. Ce processus d'accrétion en deux phases contribue à la dynamique du système binaire lors de la phase d'accrétion.

Ces observations sont en bon accord avec la théorie, mais il faudra étudier un plus grand nombre de systèmes binaires jeunes dans le détail afin de mieux comprendre le processus de formation des étoiles multiples.

## *Amas globulaires du Grand Nuage de Magellan*

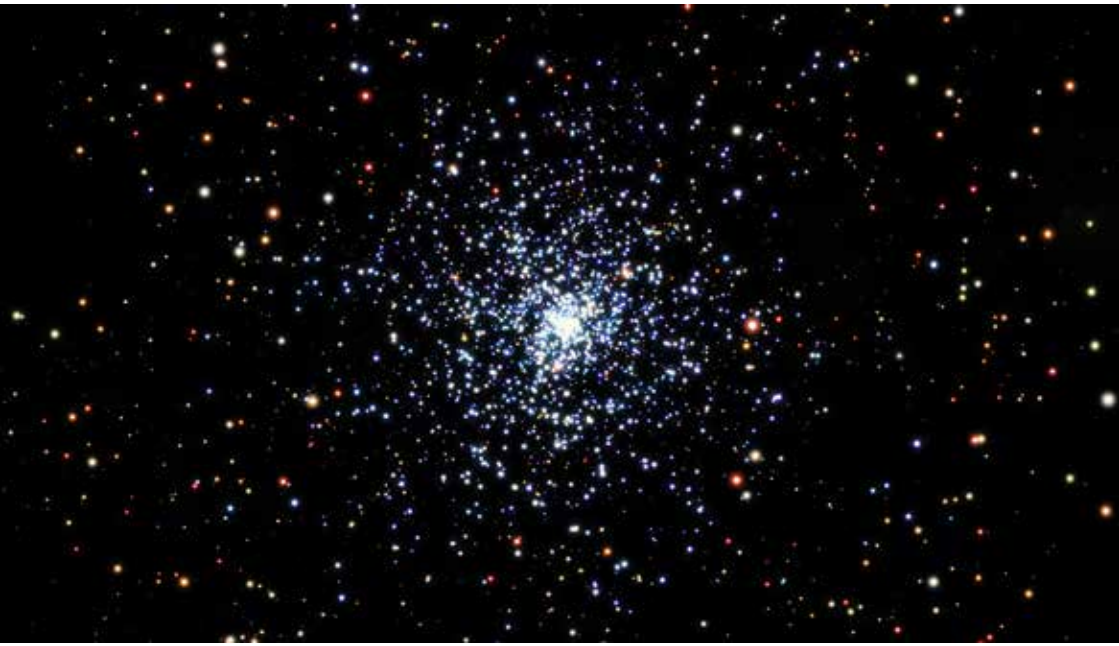
On pense généralement que les amas stellaires naissent compacts puis se dispersent plus ou moins rapidement. Des observations du Grand Nuage de Magellan faites avec le télescope Hubble viennent préciser cette évolution. Elles concernent cinq amas âgés et ont été obtenues avec les caméras WFC3 (Wide Field Camera 3) et ACS (Advanced Camera for Surveys).

Les amas globulaires peuvent contenir jusqu'à un million d'étoiles. Les interactions gravitationnelles mutuelles changent leur structure avec le temps. C'est ce qu'on appelle l'évolution dynamique. Les étoiles massives tendent à tomber vers les régions centrales tandis que les plus légères s'échappent de l'amas. Ce processus aboutit à une contraction progressive du noyau à un rythme différent selon les amas de sorte que des amas du même âge peuvent montrer des aspects différents et donc des âges dynamiques différents.

Distant de 160 000 années-lumière le Grand Nuage – un satellite de la Voie lactée – renferme des amas globulaires de tous âges, contrairement à notre galaxie qui contient majoritairement de vieux amas. La distribution des tailles des amas du Grand Nuage en fonction de leur âge est curieuse, en ce sens que tous les amas jeunes sont compacts alors que les plus vieux viennent en toutes les tailles.

Les amas globulaires, y compris ceux du Grand Nuage, contiennent des étoiles spéciales, les « blue stragglers » (« vagabondes bleues ») qui sont des étoiles ravivées après avoir reçu un supplément de combustible à l'occasion d'une collision ou en le chapardant d'une compagne. Elles paraissent ainsi

***Vue d'artiste montrant en bleu les blue stragglers dans un amas globulaire. D'une masse supérieure à la moyenne des étoiles, ils sédimentent progressivement vers le centre. (ESA/Hubble & NASA, L. Calçada)***

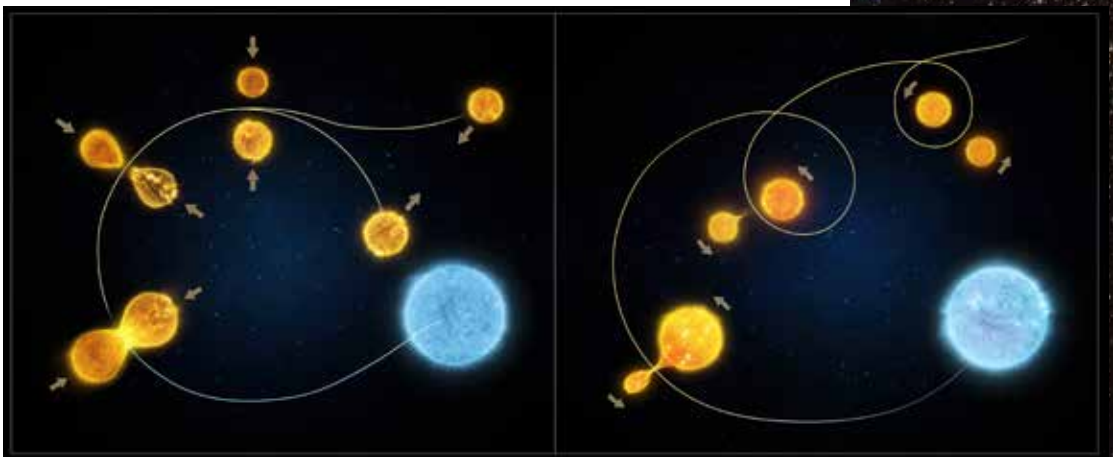


plus chaudes et plus bleues. Étant massives elles participent à la sédimentation, ou « ségrégation » vers le centre et on peut les utiliser pour évaluer l'âge dynamique des amas. C'est ce qui a été fait pour les cinq amas observés dans le Grand Nuage et a conduit à montrer qu'ils avaient des structures et des âges dynamiques très différents alors qu'ils sont nés en même temps.

Contrairement à ce que l'on pensait les amas globulaires deviennent de plus en plus compacts, chacun à sa propre allure.

***► L'amas globulaire NGC 1466 dans le Grand Nuage de Magellan, photographié par le télescope spatial Hubble. D'une masse de 140 000 soleils, il est âgé de 13,1 milliards d'années – presque autant que l'Univers. C'est l'un des cinq amas dont on a déterminé l'évolution dynamique. (ESA/Hubble & NASA)***

***▼ Deux façons de fabriquer des blue stragglers dans un amas :***
***- la collision frontale conduisant à la fusion de deux étoiles.***
***- la vampirisation d'un grosse étoile par une petite.***
***(ESA/Hubble, M. Kornmesser)***



***De gauche à droite et de haut en bas les 5 amas globulaires étudiés sont classés par âge dynamique croissant : NGC 1841, Hodge 11, NGC 2257, NGC 1466 et NGC 2210. (Ferraro et al.)***

## *Toile cosmique*

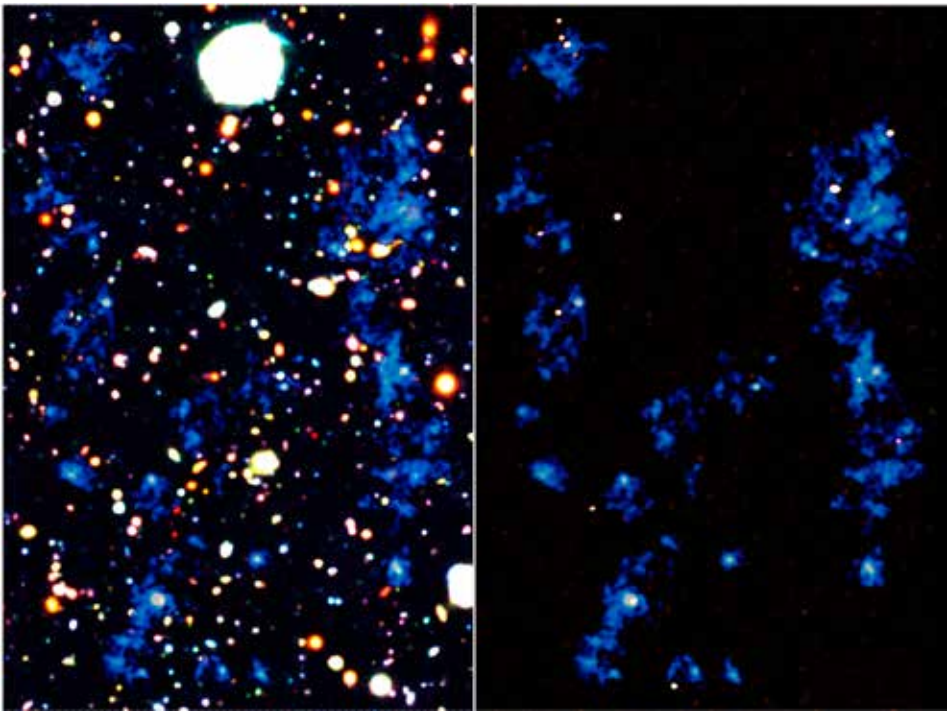
Si la mystérieuse matière noire constitue 85% de la matière de l'Univers, cela ne veut pas dire pour autant que l'on connaît bien les autres 15%. En fait, une fois recensés les réservoirs connus (étoiles, nuages, etc.), on ne sait pas avec certitude où se trouve la moitié de la matière normale. C'est ce que l'on appelle le mystère des baryons manquants. Les baryons sont les constituants essentiels de la matière normale (protons, neutrons). On imagine que ces baryons se cachent dans la structure filamenteuse de la toile cosmique mais on n'a de cette toile qu'une vision très partielle.

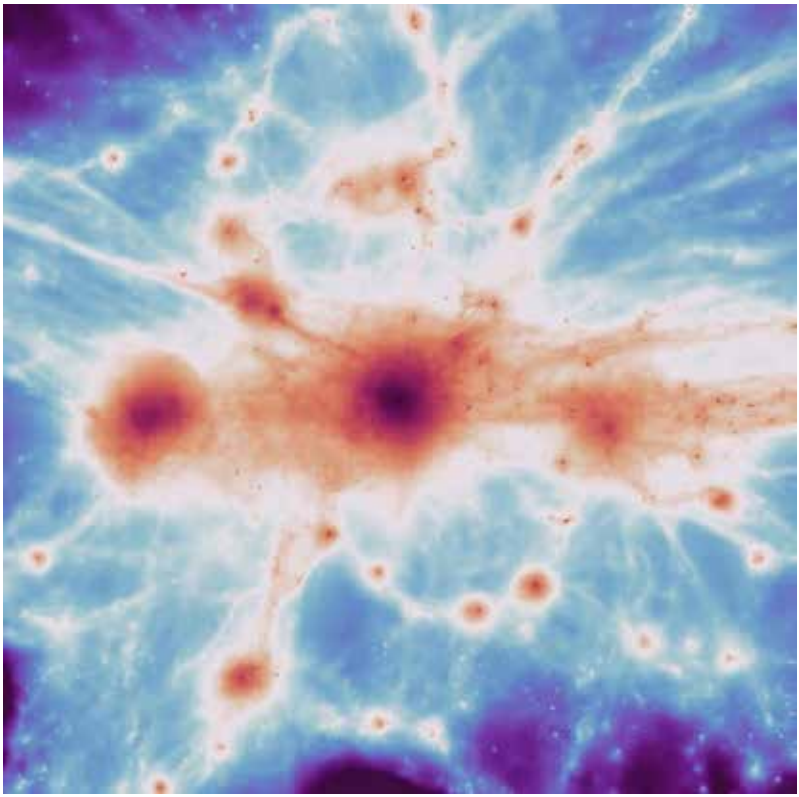
La toile cosmique est en quelque sorte le squelette de la structure à grande échelle de l'Univers telle que le conçoit le modèle cosmologique « standard ». Il y aurait d'abord eu formation de nappes, puis un effondrement de celles-ci en fils.

Il y aurait en fait une toile cosmique de matière noire et une toile lumineuse faite essentiellement de l'hydrogène produit dans le Big Bang.

Les filaments de gaz constituent aussi le WHIM (« warm-hot intergalactic medium »), appelé ainsi car ils sont aussi chauds que l'intérieur du Soleil. Les galaxies se forment préférentiellement aux points de rencontre de plusieurs filaments, là où la matière est la plus dense. Les filaments de matière noire sont

***Les filaments gazeux figurent en bleu sur ces images obtenues avec le télescope Subaru (à gauche) dans le domaine optique et ALMA (à droite) en ondes millimétriques.***
***Les points brillants dans l'image ALMA sont des galaxies à fort taux de formation stellaire.***
***(RIKEN)***





***Simulation C-EAGLE d'un amas de galaxies massif occupant une région similaire à celle où les filaments ont été observés. Les galaxies s'assemblent à la convergence des filaments. (Joshua Borrow avec C-EAGLE)***

inaccessibles aux télescopes classiques. Ceux de gaz, extrêmement ténus et peu lumineux, sont également quasiment indétectables par leurs émissions. C'est en absorption dans le spectre de quasars ou même de galaxies situés en arrière-plan que l'on a pu en déceler.

Une nouvelle étude a fait appel à une méthode entièrement différente, permettant la cartographie à deux dimensions de la toile cosmique. Cette étude a été réalisée au moyen d'un réseau global de télescopes incluant les télescopes Subaru et Keck d'Hawaii, le VLT de l'ESO et ALMA. Les astronomes se sont attaqués à SSA22, un proto-amas de galaxies situé à une distance correspondant à un âge de 12 milliards d'années. L'amas était connu pour contenir en son centre des galaxies dites « submillimétriques » très brillantes, formant beaucoup de nouvelles étoiles. On y a découvert 16 nouvelles galaxies de ce genre ainsi que 8 puissantes sources X, ce qui est rare pour cette époque reculée. Ces objets émettent énormément de rayonnement qui ionise les filaments de gaz environnants et rend ceux-ci observables directement. Les observations antérieures montraient les émissions de nuages de gaz proches de galaxies, on voit maintenant que ces nuages forment de longs filaments qui jouent un rôle prépondérant dans l'évolution des galaxies et des trous noirs supermassifs. Cette étude éclaire le mécanisme de formation des galaxies submillimétriques. On pense généralement qu'elles résultent de la fusion de deux galaxies. Les simulations numériques montrent que l'apport de gaz par les filaments suffit à expliquer leur croissance.

## *La dynamique des galaxies naines*

*Basé sur un communiqué INSU/CNRS*

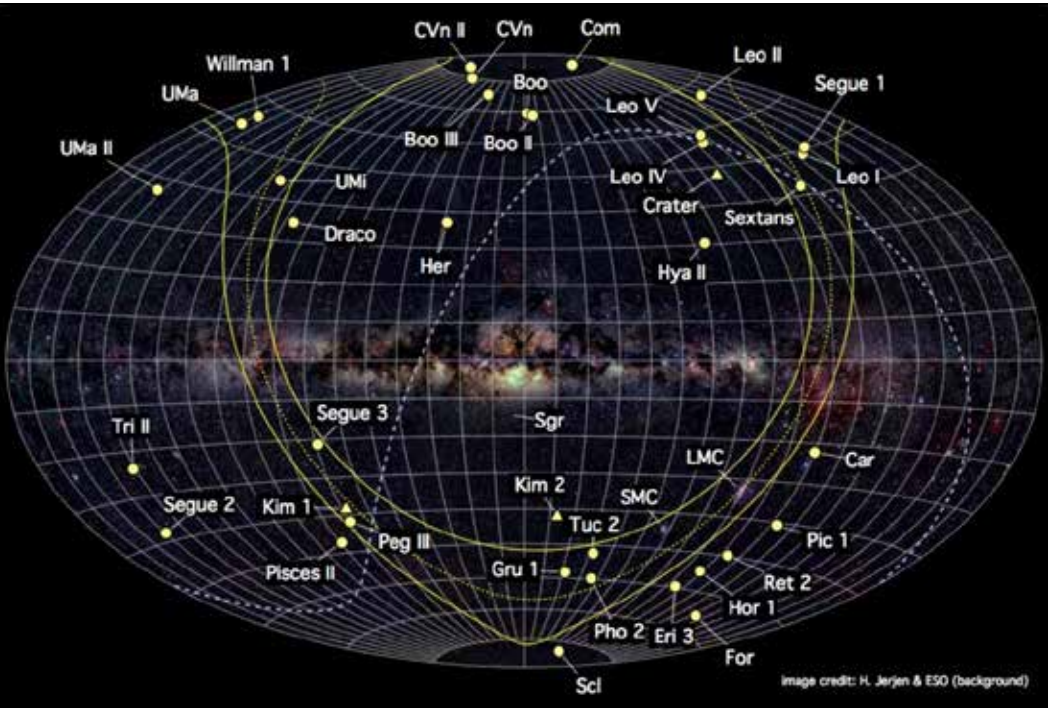
Longtemps attribuées à la présence de matière sombre, les propriétés des galaxies naines situées au voisinage de la Voie lactée s'expliquent uniquement par des effets de marée.

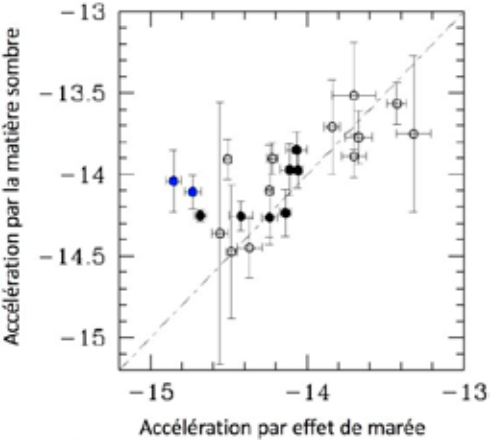
Depuis près de cinquante ans, la présence de matière sombre à toutes les échelles de l'Univers est au fondement de la cosmologie moderne.

C'est aux plus petites échelles du cosmos, au sein des galaxies naines entourant la Voie lactée, les plus minuscules qu'il nous est donné d'observer, que la matière sombre est supposée être la plus abondante. Dans ces galaxies, une agitation exceptionnelle des étoiles est observée, un phénomène que les cosmologistes expliquent en invoquant la présence d'énormes quantités de matière noire, d'une masse jusqu'à plusieurs milliers de fois supérieure à celle des étoiles. Depuis les années 1980, cette matière sombre est considérée comme indispensable pour expliquer la cohésion des galaxies : elle ajoute de la gravité qui équilibre l'agitation des étoiles, qui de son côté tend à disperser l'ensemble.

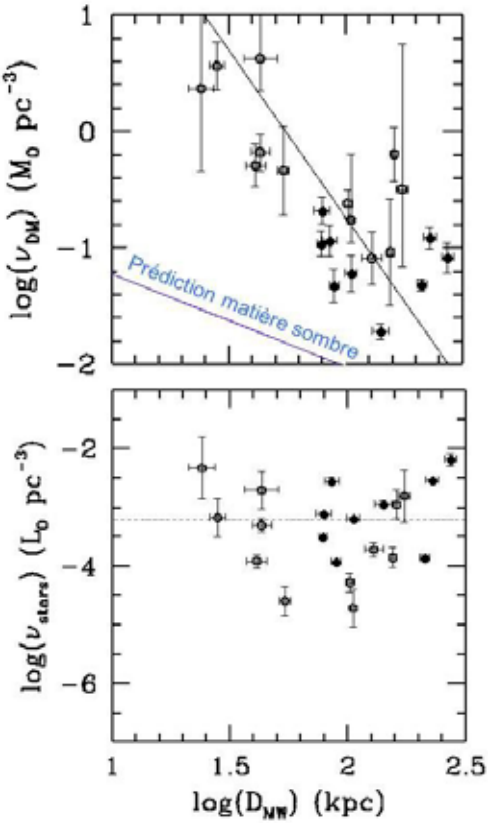
On pensait par ailleurs que les galaxies naines étaient des satellites de notre Voie lactée depuis un grand nombre de milliards d'années, expliquant ainsi le besoin d'un équilibre sur de longues périodes. Est-ce bien la réalité ?

***La Voie lactée et son cortège de galaxies naines. (H. Jerjen & ESO).***






***En ordonnée, l'accélération gravitationnelle de la matière sombre supposée contenue dans les galaxies naines. En abscisse, celle due aux effets de marée par la Voie lactée. La droite en pointillé indique l'égalité entre ces deux quantités. Les points représentent les mesures pour 21 galaxies naines. (Observatoire de Paris - PSL/ Hammer et al. 2019)***




***(Haut) : la densité de matière sombre que révèlent les observations qui prédisent qu'elle diminue fortement vers les parties externes de la Voie lactée. La droite pleine montre la pente de la corrélation avec la distance au centre, la droite en bleu montre la prédiction d'un modèle de matière sombre. (Bas) : la densité d'étoiles qui semble être indépendante de la distance au centre de la Voie lactée. (Observatoire de Paris - PSL/ Hammer et al. 2019)***

Une nouvelle interprétation est proposée qui se passe de la matière sombre. Pour leurs travaux, les scientifiques ont exploité les données astrométriques et photométriques les plus précises disponibles à ce jour.

À la parution du deuxième catalogue Gaia en 2018, les orbites des galaxies naines ont été révélées avec une bien meilleure précision. Très excentriques, elles ne corroboraient pas le scénario selon lequel les galaxies naines se seraient satellisées autour de la Voie lactée depuis des milliards d'années. Les galaxies naines semblent en effet avoir été capturées par la Voie lactée et ce, plus récemment.

De récentes données du Télescope Franco-canadien de Hawaii (CFHT) et du télescope Magellan, issues des observations les plus profondes en imagerie et en spectroscopie des galaxies naines, ont par ailleurs fourni des mesures très précises sur leurs vitesses, rayons, distances et masses en étoiles.

En exploitant ces nouvelles données on a découvert comment ces galaxies naines étaient arrivées au voisinage de notre Galaxie et comment leur dynamique est uniquement gouvernée par les seuls effets gravitationnels de marée exercés par la Voie lactée, suivant les principes de la physique newtonienne.

Le scénario d'une grande robustesse mis au jour s'est déroulé en plusieurs étapes.

1. Originellement, il s'agit de très petites galaxies naines, dites irrégulières, et dominées par du gaz froid.

2. Attirées par la Galaxie, elles tombent dans son halo. Par un effet de pression dynamique, leur propre gaz est arraché par celui du halo. Cette perte de gaz entraîne une perte de gravité : leurs étoiles se retrouvent « affolées » et vont en se dispersant dans toutes les directions.

3. Entrent en jeu les effets gravitationnels de la Voie lactée qui agissent via des chocs de marée – de même nature que ceux qui ont forgé les amas globulaires. En un mot, au sein des galaxies naines, les chocs martèlent les étoiles, lesquelles se retrouvent capturées par effet de résonance le long d'une direction privilégiée, celle qui les relie au centre de la Voie lactée.

4. La ligne de visée des astronomes – situés dans la Galaxie – se confondant pratiquement avec cette direction, les observations recueillies apparaissent conformes à l'augmentation prédite de l'agitation des étoiles par chocs de marée, tout simplement, sans recours à la matière sombre.

Ce scénario est-il suffisant pour exclure la présence de matière sombre dans les galaxies naines ?

Plusieurs observations menées par les scientifiques conduisent à le penser, à tout le moins que cette hypothétique matière sombre n'aurait aucune influence sur les propriétés physiques des galaxies naines.

Tout d'abord, les astronomes ont pu calculer les accélérations induites par les chocs de marée. Ils ont trouvé qu'aux erreurs de mesure près, elles coïncidaient avec celles supposées causées par la matière sombre (voir figure page de gauche). La coïncidence est plutôt surprenante. Aurait-on pris des chocs de marées pour de la matière sombre ?

Pour l'instant, les modèles basés sur la matière sombre semblent incapables de reproduire les nombreuses relations d'échelle entre les paramètres fondamentaux des galaxies naines : rayons, distances, vitesses, masses en étoiles. Or, ces relations d'échelle, le scénario des chocs de marée les explique parfaitement.

Ces résultats ont potentiellement d'énormes conséquences pour notre compréhension de l'Univers, bouleversant des décennies de connaissances en cosmologie. En particulier, les modèles cosmologiques les mieux admis impliquent un très grand nombre de halos de matière sombre qui devraient être autour des galaxies naines au voisinage d'une grande galaxie, telle que la Voie lactée.

S'il n'y a pas de masse sombre capable d'influencer la dynamique de ces galaxies naines, soit les galaxies naines satellites de la Voie lactée sont exceptionnelles, soit les modèles cosmologiques sont à revisiter.

## *Galaxies naines*

Les astronomes ont découvert que les trous noirs supermassifs des galaxies naines émettent des vents puissants qui affectent fortement l'évolution de celles-ci, notamment en supprimant toute formation d'étoiles.

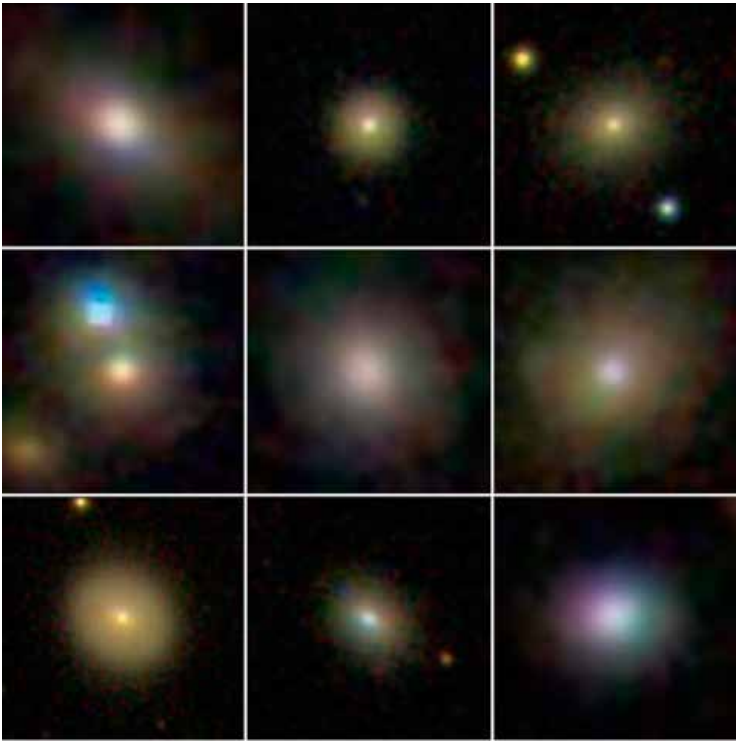
Les galaxies naines comprennent typiquement de 100 millions à quelques milliards d'étoiles. Par comparaison la Voie lactée en a entre 200 et 400 milliards. Ce sont les galaxies les plus abondantes de l'Univers et on les trouve généralement concentrées autour de plus grosses galaxies.

On soupçonne depuis longtemps l'influence des trous noirs supermassifs sur l'évolution des grosses galaxies. La nouvelle étude prouve que l'effet est aussi important, sinon plus, chez les galaxies naines.

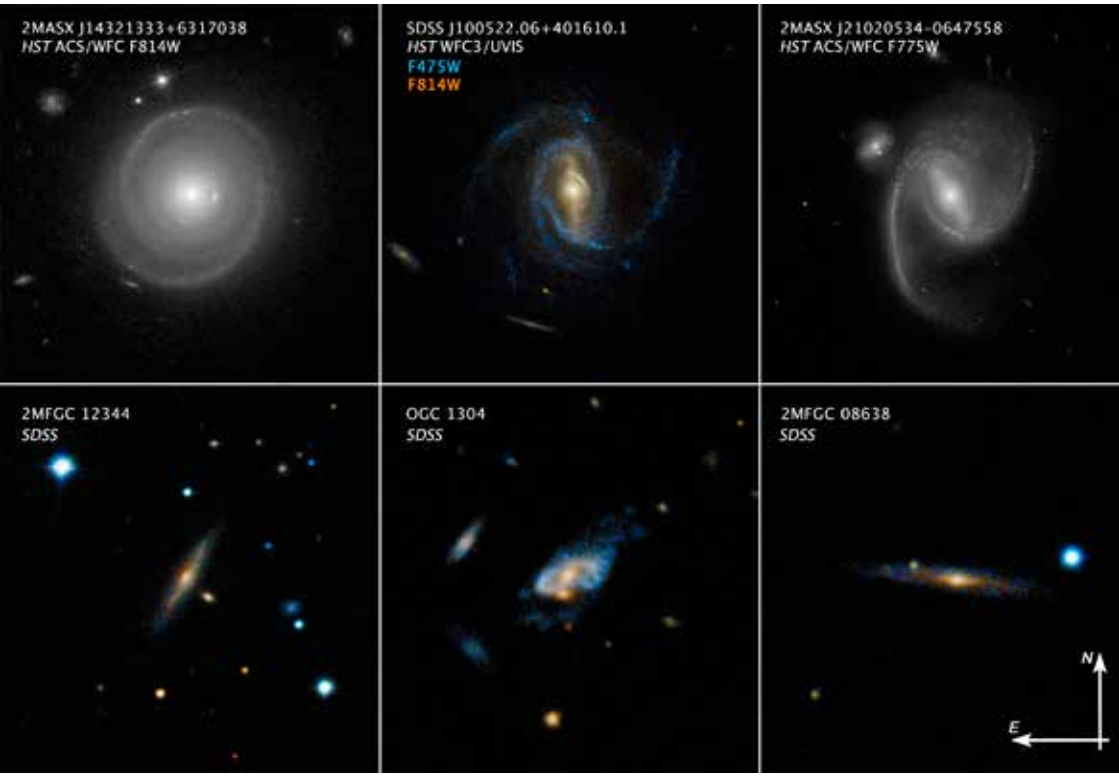
Les chercheurs ont utilisé une partie des données du SDSS (Sloan Digital Sky Survey) pour identifier 50 galaxies naines, dont 29 semblent posséder un trou noir central. Six de celles-ci émettent des vents : du gaz ionisé éjecté à grande vitesse (jusqu'à 1 000 kilomètres par seconde) des trous noirs. La puissance de ces vents a étonné les chercheurs qui ont pu les mesurer avec les télescopes Keck de Hawaii. Habituellement les vents que l'on observe dans les galaxies naines sont dus aux supernovæ et ce sont eux qui contrôlent la formation stellaire. Les vents soufflés par les trous noirs compriment tout d'abord la matière interstellaire, ce qui favorise la formation d'étoiles mais, peu à peu, le gaz se disperse et il n'en reste plus pour donner naissance à de nouvelles étoiles. C'est cette phase que semblent avoir abordée les six galaxies naines en question.

Les galaxies naines sont celles qui ont jusqu'à présent évité les collisions et fusions avec d'autres galaxies. Ce sont donc des objets primordiaux, des fossiles dont l'étude peut nous renseigner sur l'environnement de l'Univers jeune.

Les chercheurs se proposent d'analyser l'ensemble du survey SDSS afin d'obtenir un échantillon plus complet de galaxies naines avec vents de trous noirs et de mieux comprendre en quoi cette caractéristique affecte leur évolution.



***Galaxies naines renfermant des noyaux actifs et montrant d'importantes éjections. Pour 6 d'entre elles, les vents sont dus au trou noir actif. (SDSS)***




***Six super-spirales photographiées par le télescope spatial Hubble. (NASA, ESA, P. Ogle & J. DePasquale/ STScI, SDSS)***

## *Spirales endiablées*

La rotation de la Voie lactée entraîne le Soleil et les étoiles de la périphérie à des vitesses de l'ordre de 210 kilomètres par seconde. Les « super-spirales », plus grosses, plus brillantes et plus massives que notre galaxie, montrent des vitesses plus grandes encore, jusqu'à 570 kilomètres par seconde, soit plus que ce que leur masse semble commander. Ce problème a été résolu. Les astronomes ont montré que la masse de ces monstres était sous-estimée en raison de leur halo de matière noire qui est beaucoup plus massif qu'on ne le croyait – jusqu'à 40 mille milliards de fois la masse du Soleil.

Les super-spirales ont été reconnues comme une classe à part en analysant les données du survey SDSS (Sloan Digital Sky Survey) et de la base de données NED (NASA/IPAC Extragalactic Database).

La plus grosse parmi la centaine de super-spirales connues mesure 450 000 années-lumière (à comparer aux 100 000 de la Voie lactée).

Les observations réalisées avec le plus grand télescope austral, le SALT (Southern African Large Telescope) et le télescope de 5 m du Mont Palomar, ainsi que celles effectuées en infrarouge avec WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer) ont révélé les vitesses de rotation des super-spirales, leur masse stellaire et le taux de formation stellaire.

La théorie suggère que ces galaxies tournent rapidement car elles se trouvent dans de grands halos de matière noire. C'est Vera

Rubin qui avait montré la première fois que la masse des galaxies devait être bien supérieure à celle cumulée du gaz et des étoiles pour expliquer la rotation des galaxies, d'où le concept de matière noire.

Le même phénomène se manifeste pour les super-spirales, avec des halos gigantesques et très massifs du genre de ceux que l'on associerait plutôt à des amas de galaxies qu'à des galaxies isolées.

Le fait que la surabondance de matière noire explique simplement la rotation des super-spirales pose à nouveau un problème aux théories alternatives de la gravité comme MOND (Modified Newtonian Dynamics). Si on ajuste MOND pour reproduire la rotation des galaxies normales, cette théorie ne marche plus pour les super-spirales.

On explique la prépondérance de la matière noire par rapport aux étoiles par l'inhibition de la formation stellaire par la matière noire. Cela peut être dû à l'échauffement du gaz lorsque des nuages sont absorbés par les galaxies. Cet échauffement empêche la formation d'étoiles. D'un autre côté la rotation rapide des galaxies peut être un frein à l'effondrement des nuages de gaz. Malgré cela le taux de formation stellaire des super-spirales n'est pas négligeable. Elles convertissent une trentaine de fois la masse du Soleil en étoiles chaque année. En comparaison, pour la Voie lactée ce chiffre est de un. Pour les elliptiques géantes, il est nul : la plupart de leurs étoiles sont nées il y a plus de dix milliards d'années.

***Le télescope SALT (Southern African Large Telescope) est l'un des plus grands du monde avec une ouverture de 11,1 m × 9,8 m. Son design est basé sur celui du HET (Hobby-Eberly Telescope) de l'observatoire McDonald. (Lengau, CC BY-SA 4.0)***

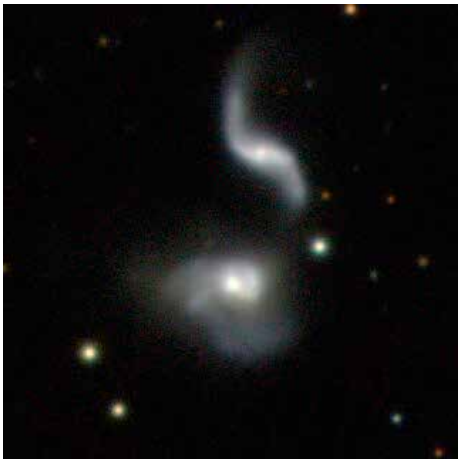
***Quelques super-spirales apparaissant dans le survey SDSS. Parmi les plus particulières remarquons les numéros (1) bras multiples, (8) asymétrique à deux bras, (21) anneau, (23) queue de marée possible, (33) disque asymétrique, (34) bulbe secondaire possible, (53) segments de bras ou d'anneaux.***
***(SDSS)***

***SDSS J094700.08+254045.7 est l'une des plus grosses super-spirales connues, trois fois plus étendue que la Voie lactée.***
***(SDSS)***

## *Fusions galactiques*

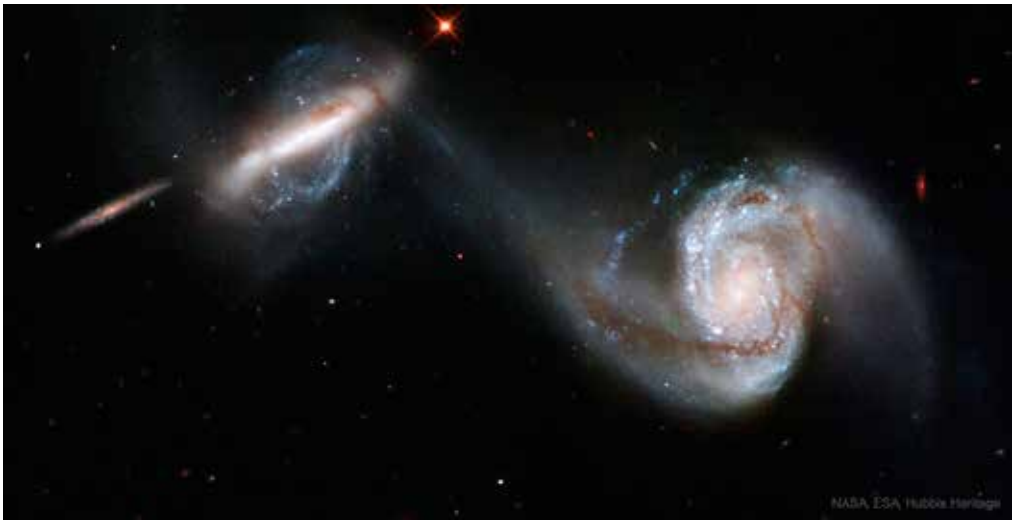
Quand des galaxies se rencontrent et fusionnent, la compression des nuages de gaz entraîne de brefs épisodes de formation d'étoiles. L'intelligence artificielle appliquée à un échantillon de 200 000 galaxies a permis de valider ce scénario. Les astronomes ont trouvé deux fois plus de ces épisodes dans les galaxies en collision que dans les autres.

La taille de l'échantillon a imposé l'utilisation d'algorithmes automatiques pour reconnaître les galaxies en interaction. Cette méthode a l'avantage d'être reproductible et non affectée par l'humeur ou la fatigue des chercheurs. Le problème est évidemment la définition algorithmique de ce qu'est une collision de galaxies. L'apparition de surveys de plus en plus grands et de bases de données gigantesques impose inévitablement ce genre de technique. Lorsque l'on traitera des milliards de galaxies, même des projets collectifs, citoyens, comme Galaxy Zoo ne suffiront plus.



***Exemple de galaxies fusionnant identifiées par un algorithme d'intelligence artificielle. (SRON Netherlands Institute for Space Research)***

***Les galaxies NGC 3808A et NGC 3808B en train de fusionner sont également connues comme Arp 87. (NASA/ESA/Hubble)***



***Cette image d'Encelade prise à contre-jour par Cassini en 2007 montre distinctement les éjections des geysers. (NASA/JPL/Space Science Institute)***

## *Encelade*

De puissantes sources hydrothermales éjectent de la matière en provenance du cœur d'Encelade, une des grosses lunes de Saturne. Cette matière se mêle à l'eau de l'océan souterrain, puis s'évapore et se condense sur les grains de glace dans des fractures de la surface. Les grains sont alors expulsés dans l'espace avec la vapeur d'eau.

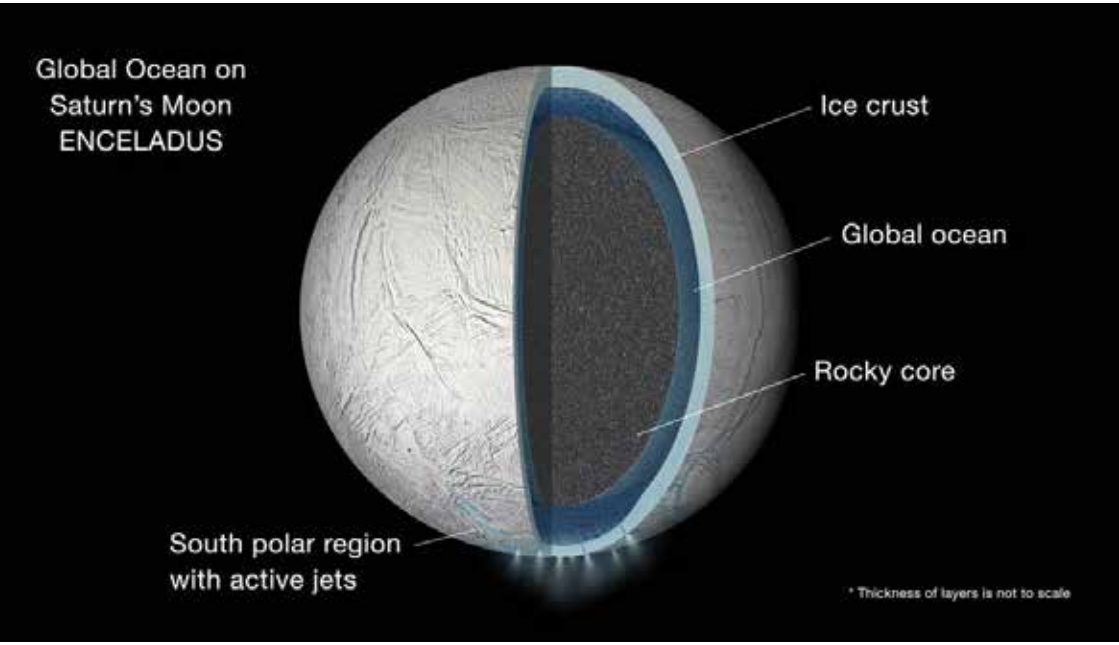



***Illustration de l'intérieur de la lune de Saturne, Encelade, montrant l'océan souterrain et les geysers du pôle sud. (Les épaisseurs des couches ne sont pas à l'échelle.) (NASA/JPL-Caltech)***

L'examen des données du spectromètre de masse du CDA (Cosmic Dust Analyzer ) à bord de la mission Cassini a permis de découvrir des composés organiques à base d'azote et d'oxygène sur les poussières expulsées par Encelade dans l'anneau E.

Sur Terre, de tels composés interviennent dans les réactions chimiques qui produisent des acides aminés, les éléments constitutifs de la vie. Les sources hydrothermales sur les fonds océaniques terrestres fournissent l'énergie qui alimente ces réactions. Il n'est pas interdit de penser que, de la même manière, des sources hydrothermales puissent opérer sur Encelade et conduire à la formation d'acides aminés. Les acides aminés ne sont peut-être pas indispensables à la vie extraterrestre mais cette découverte représente néanmoins une pièce importante du puzzle.

Cette découverte s'ajoute à celle faite l'an dernier de molécules organiques complexes flottant probablement à la surface de l'océan souterrain. Les nouvelles molécules sont plus petites et solubles et sont des éléments potentiellement précurseurs des acides aminés et autres ingrédients requis pour la vie terrestre. La possibilité de trouver de la vie sous la surface d'Encelade n'est donc pas négligeable.

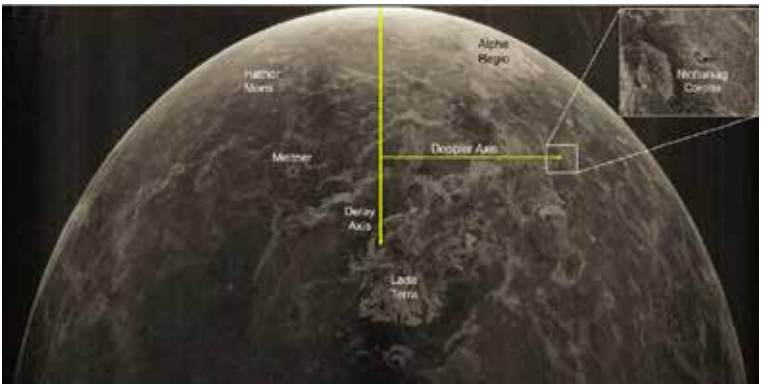



***Image radar de la surface de Vénus montrant l'une des régions repères utilisées pour estimer la rotation de la planète. (Campbell et al., 2019)***

## *Rotation de Vénus*

Si la période orbitale de Vénus est connue depuis longtemps – depuis Copernic – il n'en est pas de même de sa période de rotation. L'épaisse couche nuageuse qui recouvre la planète est totalement opaque pour nos télescopes. Tout au plus avait-on pu depuis le sol observer dans l'ultraviolet proche des structures nuageuses relativement stables revenant avec une périodicité d'environ 4 jours. Mais les nuages d'altitude dans une atmosphère aussi épaisse que celle de Vénus n'ont guère de raisons d'être figés par rapport à la surface.

Ce n'est qu'au début des années 1960 que des observations radar purent percer l'enveloppe nuageuse de la planète et donner une première valeur de sa période de rotation sidérale. Celle-ci était étonnamment lente, 243 jours – plus longue que la période orbitale de 225 jours – et, qui plus est, rétrograde. Cela fait un jour solaire de 117 jours. L'année cythéréenne comporte donc à peine deux jours, ce qui fait un calendrier assez simple, généralement de deux jours, avec de temps à autre une année d'un jour. L'atmosphère tourne effectivement en quatre jours – on parle de super-rotation – avec des vents de l'ordre de 100 mètres par seconde.

Les mesures radar faites depuis le sol et celles obtenues par les sondes spatiales ont précisé la valeur de la rotation tout en montrant de légères variations que l'on peut attribuer à la friction de l'atmosphère et aux marées solaires.

Une récente analyse de trois décennies d'observations radar fournit une valeur moyenne de 243,0212 ± 0,0006 jours. Les astronomes espèrent encore améliorer cette précision, en tenant compte des fluctuations, ne serait-ce que pour assurer le succès de futures missions avec atterrisseurs.

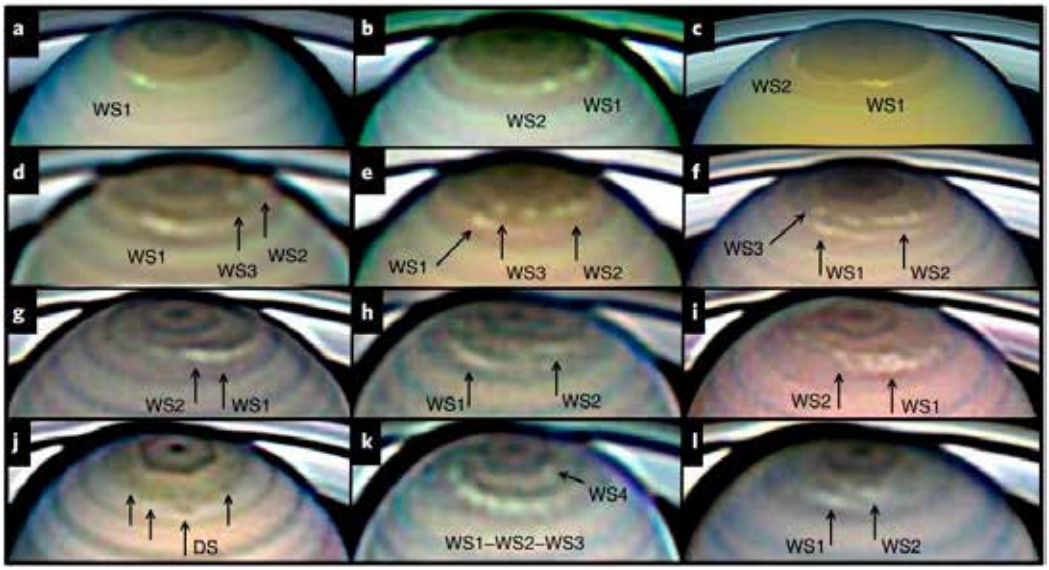
***Vénus vue en ultraviolet par Pioneer Venus. La forme en V caractéristique des nuages est due aux vents plus rapides soufflant à l'équateur. (NASA)***

## *Les tempêtes moyennes de Saturne*

On connaissait les petites et grosses tempêtes de Saturne. Il faut y ajouter les tempêtes moyennes que l'on vient de découvrir près du pôle nord de la planète.

Les petites tempêtes font typiquement 2 000 kilomètres de large et disparaissent en quelques jours alors que les grandes – les « Grandes Taches Blanches » – peuvent être dix fois plus étendues et durent des mois.

Les chercheurs ont décelé les tempêtes moyennes l'an passé dans la région polaire nord en étudiant des données provenant de sources diverses, notamment des images obtenues par des astronomes amateurs mais aussi des documents du télescope spatial Hubble et de l'observatoire de Calar Alto. Ces tempêtes mesurent plusieurs milliers de kilomètres et ont des durées très variables, d'une dizaine de jours jusqu'à plusieurs mois. Elles sont apparues entre mars et octobre comme de petites taches blanches brillantes. On sait que les tempêtes de Saturne démarrent dans les basses couches de nuages, bien en dessous de la couverture nuageuse supérieure.

Des modèles ont montré qu'elles dépensent en moyenne dix fois plus d'énergie que les petites tempêtes, mais moins de cent fois moins que les Grandes Taches Blanches. Il est possible qu'il s'agisse de grandes tempêtes avortées. Pour tester cette hypothèse, les chercheurs comptent poursuivre les observations afin de déterminer l'importance des éclairs produits par les tempêtes moyennes.

***Le système complexe des tempêtes boréales de 2018 avec, entre parenthèses, les observateurs : a, 1 avril (D. Peach) ; b, 26 mai (A. Casely) ; c, 6 juin (HST-OPAL programme) ; d, 23 juin (T. Barry) ; e, 28 juin (D. Peach) ; f, 30 juin (D. P. Milika et P. Nicholas) ; g, 11 juillet (B. Macdonald) ; h, 8 août (T. Barry) ; i, 16 août (F. Silva-Correa) ; j, 18 août (D. Peach) ; k, 19 août (T. Barry) ; l, 16 septembre (B. Macdonald). DS indique des taches noires. (Nature Astronomy (2019). DOI: 10.1038/s41550-019-0914-9)***