

VRAI OU FAUX

Tous les animaux dorment-ils ?

Oui. Divers critères physiologiques et comportementaux ont permis d'identifier des phases de sommeil chez toutes les espèces étudiées.

Irene Tobler-Borbély

Comment reconnaître le sommeil chez les animaux ? Par les yeux fermés ? Les bébés humains dorment parfois les yeux ouverts, et les poissons et les insectes n'ont pas de paupières. Par une position allongée ? Les chevaux, les girafes et les éléphants peuvent – littéralement – dormir debout, même si leur sommeil est alors moins profond. Pour distinguer le sommeil de la veille et déterminer si tous les animaux dorment, on définit donc d'autres critères.

On mesure notamment les activités cérébrale et musculaire, ainsi que les mouvements des yeux. Ces paramètres étant très fluctuants même chez un sujet endormi, on ne définit pas un mais plusieurs états caractéristiques du sommeil. Chez l'homme, on distingue deux stades, qui se succèdent : le second comporte des mouvements oculaires rapides (on parle de sommeil REM, pour *Rapid Eye Movement*), un comportement absent du premier stade (dit non-REM ou sommeil lent, et subdivisé en trois). Le neurobiologiste français Michel Jouvet a qualifié le stade REM de sommeil paradoxal, car les ondes cérébrales ressemblent à celles mesurées chez un sujet éveillé et car l'activité musculaire est nulle, à l'exception de contractions dans les extrémités (doigts, visage...) et des mouvements oculaires.

Outre ces paramètres physiologiques, divers critères comportementaux permettent de reconnaître le sommeil. Le plus évident est une quasi-immobilité, réversible par l'application d'un stimulus adéquat (telle une lampe de poche braquée sur l'animal), en général dans un site de couchage (nid,

grotte, arbre, fond sableux) et dans une position spécifique. En outre, un animal endormi répond peu aux stimulus externes et est plus difficile à perturber que lorsqu'il est dans une phase d'éveil calme.

Les insectes dorment aussi

Quels sont alors les animaux qui dorment ? Sur la base des critères comportementaux, le sommeil a été identifié chez toutes les espèces étudiées. Celles-ci comprennent de nombreux vertébrés (mammifères, oiseaux, reptiles, amphibiens et poissons), mais aussi des invertébrés, tels les scorpions, les écrevisses, les cafards, les mouches et le nématode *Caenorhabditis elegans* (un petit ver).

L'existence du sommeil a été confirmée par les critères physiologiques chez de nombreux mammifères et oiseaux. La quasi-totalité d'entre eux dorment par cycles, successifs ou séparés. Chacun est composé d'un stade non-REM, suivi d'un stade REM. Parmi les mammifères, seuls les dauphins n'ont pas de sommeil REM. Comment s'en passent-ils ? On l'ignore, de même qu'on ignore la fonction de ce type de sommeil. En outre, lorsqu'ils sont dans leur phase de sommeil la plus profonde, les dauphins ont un hémisphère cérébral endormi et l'autre éveillé, sans doute pour maintenir leur orifice respiratoire à la surface.

Chez les oiseaux, le sommeil REM est bien plus court que chez les mammifères : une minute par cycle environ, tandis qu'il dure jusqu'à 20 minutes chez les humains.



Certains oiseaux migrateurs peuvent peut-être dormir lorsqu'ils planent en altitude, mais on manque d'outils adaptés pour le confirmer. Globalement, la quantité de sommeil est très variable selon les espèces, les saisons et les conditions d'observation.

Des différences d'activité cérébrale correspondant à un état endormi et un état éveillé apparaissent aussi chez les reptiles, mais on n'observe pas plusieurs stades de sommeil. Chez les amphibiens et les poissons, on manque d'études de ce type. Chez les invertébrés, seules les activités cérébrales de l'écrevisse et de la drosophile ont été étudiées : là encore, on observe un état endormi, différent d'un état éveillé.

La drosophile est d'ailleurs un invertébré modèle précieux pour l'étude du sommeil. Elle a déjà permis de clarifier certains mécanismes physiologiques en jeu. À l'instar des mammifères, elle est sensible aux substances hypnotiques (utilisées pour endormir le sujet lors d'une anesthésie générale) et à la caféine.

Il semble donc que tous les animaux dorment. Toutefois, il y a plus de sept millions d'espèces sur la planète et le sommeil n'a été étudié que sur environ 240 d'entre elles ; cette affirmation est donc à prendre avec prudence. Il serait intéressant d'identifier l'espèce la plus ancienne et la plus primitive qui dorme, ainsi que des espèces qui ne dorment pas : elles fourniraient peut-être des indices sur la fonction du sommeil, encore mal connue. ■

Irene TOBLER-BORBÉLY est chercheuse à l'Institut de pharmacologie et de toxicologie à l'Université de Zurich, en Suisse.

Les étoiles

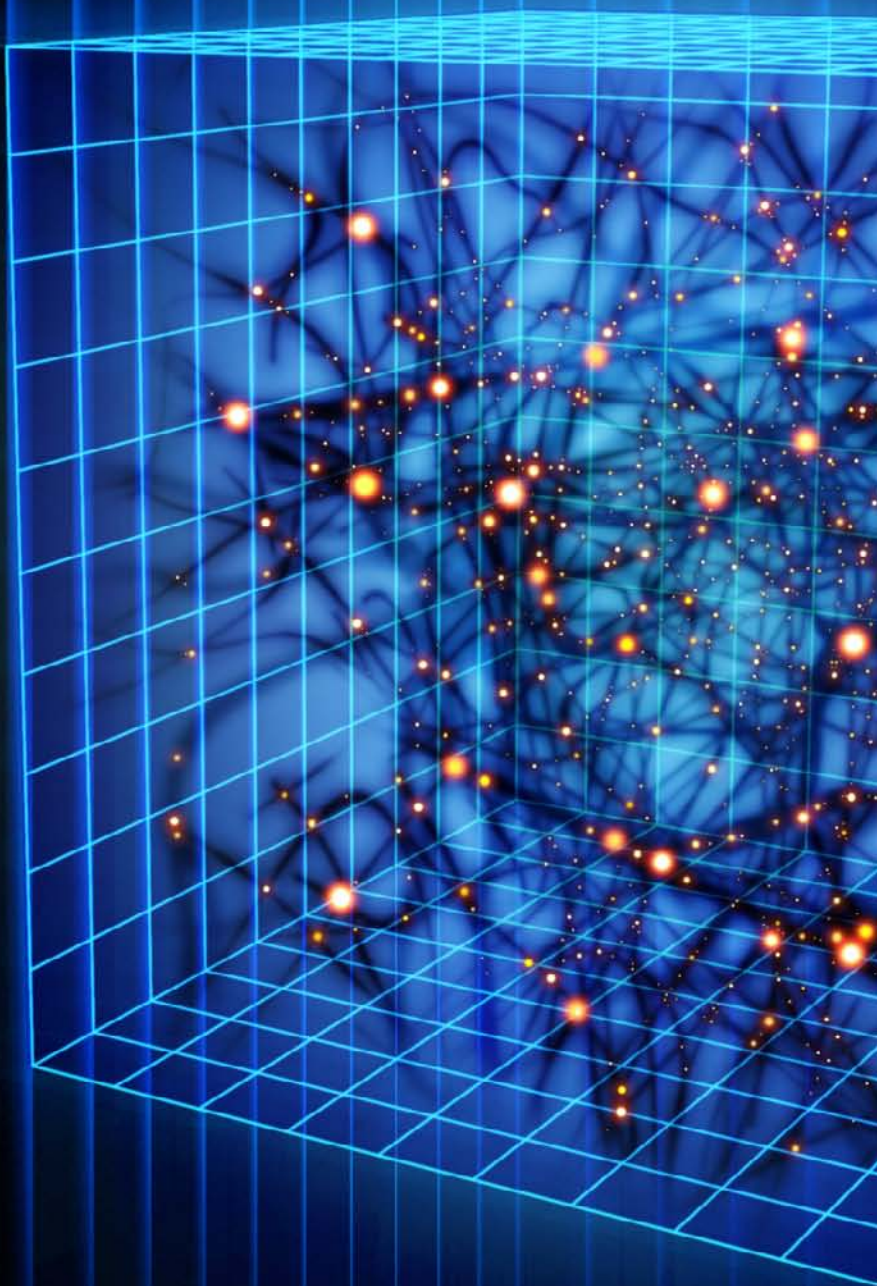
des astres venus

Les premières étoiles de l'Univers, gigantesques et très lumineuses, puisaient peut-être leur énergie dans l'annihilation de particules de matière noire.

K. Freese, P. Gondolo et P. Salati

Le Soleil et toutes les autres étoiles visibles sont constitués des restes de gaz et de poussière de plusieurs générations d'étoiles. Les astrophysiciens commencent à bien comprendre les mécanismes à l'œuvre dans l'évolution de ces astres. Mais faute d'informations, la première génération d'étoiles reste mal connue. À quoi ressemblait-elle ? Fonctionnait-elle sur les mêmes principes physiques que les étoiles actuelles ?

Les premières étoiles n'ont jamais été observées. Néanmoins, certains modèles les décrivent comme étant bien plus massives et lumineuses que les astres actuels. En outre, leur source d'énergie pourrait avoir été très différente. Les étoiles classiques ne sont constituées que de matière ordinaire et leur énergie provient de la fusion de noyaux atomiques. En revanche, la vie des premières étoiles aurait été intimement liée non seulement à la matière ordinaire, mais aussi à la matière noire. Cette composante de l'Univers, dont la nature reste aujourd'hui inconnue, a probablement eu un rôle actif dans la naissance des premières étoiles. Elle a permis, par des effets gravitationnels, d'accumuler de gigantesques quantités de gaz pour former les étoiles (*voir la figure 1*). Mais, plus surprenant, la matière



noires

du fond des âges



L'ESSENTIEL

- La première génération d'étoiles s'est formée au sein des halos de matière noire entre 50 et 500 millions d'années après le Big Bang.
- Ces astres sont plus grands et plus lumineux que les étoiles ordinaires.
- Ils puisent leur énergie dans l'annihilation de neutralinos, particules hypothétiques qui composent la matière noire.
- Une nouvelle génération de télescopes permettrait de les observer directement, grâce au phénomène de lentille gravitationnelle.

© Montalithic Studios/Kern Brown

1. DANS L'UNIVERS PRIMORDIAL, la matière noire est regroupée en filaments et en halos au sein desquels se sont constituées les premières étoiles.

noire aurait servi de source d'énergie à ces étoiles primordiales, que l'on peut ainsi qualifier d'étoiles noires.

La première génération d'étoiles aurait donc connu une évolution stellaire atypique et très différente de celle des étoiles actuelles. Comprendre le fonctionnement des étoiles noires permettrait de compléter la vision que les astrophysiciens ont de la vie des étoiles depuis leur toute première génération.

Le modèle que nous avons proposé en 2007 et que nous décrivons ici rend compte de l'évolution des étoiles noires : comment elles sont nées, comment elles sont devenues lumineuses grâce à l'annihilation de matière noire et comment elles sont mortes. Ces travaux restent à confirmer par des observations. Cette tâche est complexe en raison de l'éloignement temporel des étoiles noires : elles ont disparu il y a 13 milliards d'années et la lumière qui nous en parvient aujourd'hui est très atténuée, quasi indétectable.

En outre, la matière noire constitue une énigme supplémentaire. Les particules qui la composent restent à identifier. Toutefois, comme nous le verrons par la suite, les caractéristiques générales de la matière noire permettent de concevoir toute l'évolution de ces étoiles, depuis leur formation jusqu'à leur fin. Enfin, ces modèles d'étoiles noires laissent entrevoir quelques espoirs d'en observer la trace grâce à une future génération de télescopes spatiaux.

La fin de l'âge sombre

La première génération d'étoiles s'est formée alors que l'Univers était âgé de 50 à 500 millions d'années. Leur naissance a mis fin à ce qu'on nomme l'« âge sombre », qui a succédé à un phénomène crucial pour la cosmologie moderne, la « recombinaison ». Dans le cadre du modèle du Big Bang (voir la figure 2), l'Univers est en expansion et sa température ne cesse de décroître. Il a connu différentes phases. Vers 375 000 ans, il s'était suffisamment refroidi – à environ 3 000 degrés (en kelvins) – pour que les électrons et les noyaux aient pu s'associer et former un gaz électriquement neutre d'atomes d'hydrogène et d'hélium : c'est la recombinaison. La lumière, qui interagissait fortement avec le plasma chargé, a pu alors s'échapper et s'est propagée dans l'espace jusqu'à aujourd'hui, près de 13,8 milliards d'années plus tard. Ce rayonnement, dit du fond diffus cosmologique, est une mine

d'informations sur la structure de l'Univers, sa géométrie et sa composition, en particulier les proportions de matière ordinaire et de matière noire. Les cosmologistes étudient ce rayonnement aujourd'hui grâce à des sondes spatiales telles que WMAP, lancée en 2001 par l'Agence spatiale américaine, ou *Planck*, mise en orbite en 2005 par l'Agence spatiale européenne.

Avec la recombinaison, l'Univers, rempli de gaz froid et sans source de lumière, est entré dans l'âge sombre. Un observateur de cette période n'aurait vu aucune lumière dans le spectre visible et aurait été plongé dans l'obscurité. Cette période a pris fin lorsque les premières étoiles se sont embrasées, entre 50 et 500 millions d'années après la naissance de l'Univers. La condensation du gaz primordial d'hydrogène et d'hélium en nuages protostellaires a conduit à l'apparition des premiers objets lumineux, dont l'intense émission dans l'ultraviolet a ionisé les atomes du milieu intergalactique. Les mesures de la sonde WMAP indiquent que cette réionisation s'est achevée vers 480 millions d'années.

Les premières étoiles, également qualifiées de population III (elles se distinguent des étoiles actuelles de population II, pauvres en métaux, et des étoiles de population I, riches en métaux car plus récentes), ont dû apparaître relativement tôt au cours de l'âge sombre pour provoquer la réionisation.

■ LES AUTEURS



Katherine FREESE est professeur de physique à l'Université du Michigan, aux États-Unis, et directrice adjointe du Centre de physique théorique du Michigan.



Paolo GONDOLLO est professeur de physique et directeur de l'Institut d'astrophysique de haute énergie à l'Université de l'Utah, aux États-Unis.



Pierre SALATI est professeur à l'Université de Savoie et au Laboratoire de physique théorique d'Annecy-le-Vieux.

En général, les étoiles se forment par effondrement gravitationnel des nuages de gaz. Mais le processus est trop lent pour que le gaz se soit condensé seul et efficacement avant la réionisation. La solution a été de supposer que l'Univers recélait une autre composante susceptible d'aider la matière à s'agglomérer. Il s'agit d'un type différent de matière capable de constituer des zones denses, sous forme de mini-halos, avant même la recombinaison, et soumis à ses propres effets gravitationnels. Ces mini-halos auraient grandi et formé par la suite des pièges pour la matière ordinaire, où seraient apparus les premiers objets stellaires.

Indispensable matière noire

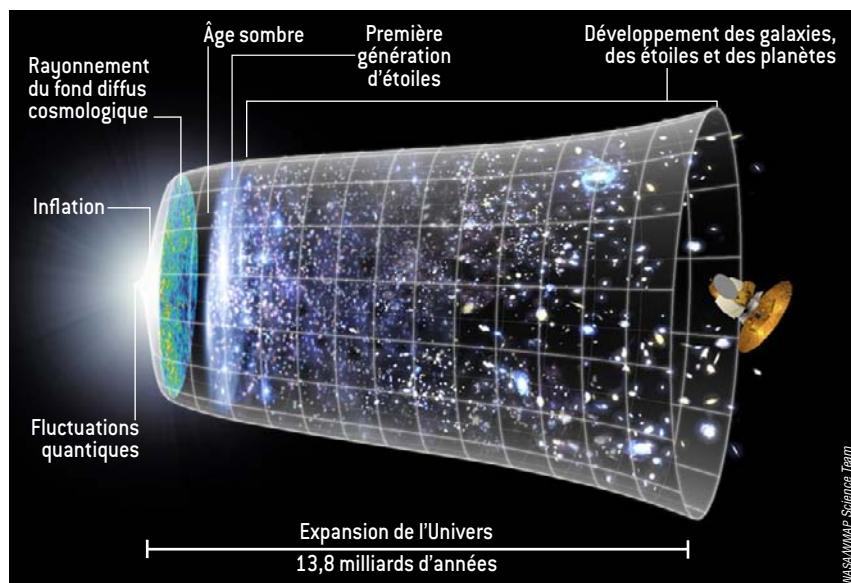
La matière noire est la clef du mécanisme d'effondrement des nuages de gaz. D'après les observations de la sonde WMAP, la matière ordinaire ne représentait que 15 pour cent de la composition de l'Univers au cours de l'âge sombre. Le reste était sous forme de matière noire.

Ce type de matière a été imaginé en 1933 par l'astronome suisse Fritz Zwicky lors de ses travaux sur l'amas de Coma. Distant d'environ 150 millions d'années-lumière, l'amas de Coma contient des milliers de grosses galaxies de taille comparable à la Voie lactée. Zwicky a mesuré les vitesses des galaxies au sein de l'amas et en a déduit la force de gravitation, donc la masse totale de l'amas, à l'origine de cette dynamique.

Le résultat de son calcul était 200 fois supérieur à ce que laissait supposer le recensement du contenu en matière de l'amas à partir de sa luminosité. Tel un gigantesque iceberg, l'amas de Coma ne laissait apparaître qu'une infime fraction de sa masse, l'essentiel étant obscur. Depuis 1933, de nombreuses observations ont révélé la présence de matière noire à toutes les échelles, aussi bien au sein des galaxies que dans l'Univers dans son ensemble.

La matière noire est constituée de particules de nature inconnue. Les physiciens et les cosmologistes ont cependant tracé les grandes lignes de leurs propriétés : ces particules sont électriquement neutres, interagissent peu avec la matière ordinaire, et ont été produites en abondance dans l'Univers primordial.

Contrairement au gaz de baryons (constituants de la matière ordinaire tels que les protons et les neutrons), la matière noire a formé des structures dès les premiers instants



2. LE MODÈLE DU BIG BANG DÉCRIT L'ÉVOLUTION DE L'UNIVERS. L'âge sombre est une période dépourvue de source de lumière qui débute vers 380 000 ans, après la recombinaison des noyaux et des électrons et l'émission du rayonnement du fond diffus cosmologique. Il s'achève avec la naissance des premières étoiles, 50 à 500 millions d'années plus tard.

Le neutralino est l'une des nombreuses particules introduites par la supersymétrie, une des extensions possibles du modèle standard de la physique des particules. Ses propriétés ne sont connues que dans les grandes lignes. L'une des missions du Grand Collisionneur de hadrons (le LHC) du CERN à Genève est de déterminer si la supersymétrie existe et de préciser les caractéristiques du neutralino.

Ce dernier, 10 à 1 000 fois plus massif que le proton, est électriquement neutre et n'interagit que faiblement avec son environnement. Dans de nombreux scénarios supersymétriques, le neutralino est stable, ce qui en fait un bon candidat pour la matière noire.

Les physiciens espèrent le détecter grâce à différents types d'observations. Il peut, avec une faible probabilité, interagir avec un noyau d'un détecteur terrestre et y laisser une trace ténue de son passage. De

nombreuses expériences de détection directe tentent d'observer de tels événements dans des laboratoires souterrains à l'abri du rayonnement cosmique et bien protégés de la radioactivité, qui masquerait son signal.

Par ailleurs, deux neutralinos peuvent s'annihiler, le neutralino étant sa propre antiparticule.

L'expérience HESS-II recherche des signes d'annihilation de matière noire.



Ainsi, lorsque deux de ces particules se rencontrent, il y a une forte probabilité qu'elles s'auto-détruisent en émettant deux photons ou d'autres particules. Ce phénomène assure que cette particule existe dans des proportions com-

patibles avec l'existence de la matière noire. Dans l'Univers primordial, les neutralinos étaient en équilibre avec le milieu dense et chaud : ils s'annihilaient sans cesse, mais étaient aussitôt régénérés à partir du plasma environnant. Celui-ci finit cependant par se refroidir et l'annihilation l'emporta. Les neutralinos disparurent en grande partie,

mais pas complètement. Lorsqu'ils étaient devenus trop rares, ils ne se rencontraient plus que de façon sporadique et l'annihilation finit par cesser. Cela intervint lorsque l'Univers n'était âgé que de quelques milliardièmes de seconde.

Les neutralinos restants formèrent la matière noire. Leur densité dépend de la probabilité d'annihilation – on parle de « section efficace d'annihilation ». Plus l'annihilation est fréquente, moins il reste de particules. La densité de matière noire mesurée par WMAP indique que la section efficace d'annihilation des neutralinos est de l'ordre du picobarn (soit 10^{-36} centimètre carré), une valeur comparable aux prévisions des théories supersymétriques.

Cette annihilation continue à se produire lentement aujourd'hui dans des régions qui présentent une forte densité de matière noire, car plus la densité est élevée, plus la rencontre de deux neutralinos est probable. Le halo de matière noire qui enserrera la Voie lactée est un lieu possible d'annihilations. Ces dernières produisent notamment des particules d'antimatière et des photons de haute énergie, que les expériences dites de détection indirecte tentent d'observer.

de l'Univers. Cette différence de comportement provient de l'interaction des baryons avec les photons de haute énergie dans le plasma primordial. Les photons ont maintenu une distribution homogène des baryons et ont empêché la formation de régions plus denses que d'autres. Les particules de matière noire ne subissent d'interaction de ce type, mais, étant sensibles à l'interaction gravitationnelle, elles ont formé des petits « halos » d'une masse équivalente à celle de la Terre.

Ces structures ont fusionné ensuite pour devenir des halos un million de fois plus massifs que le Soleil. Pendant l'âge sombre, ces halos ont constitué des zones de fort champ gravitationnel qui ont piégé et accumulé de grandes quantités de matière baryonique. Le gaz, en particulier de l'hydrogène moléculaire qui se refroidit rapidement et permet la condensation du gaz, est tombé au centre des halos et a formé les étoiles de population III dont la masse atteignit une centaine de masses solaires.

Dans le schéma classique des étoiles primordiales, la source d'énergie stellaire provient essentiellement des réactions thermonucléaires de la « chaîne proton-proton », chaîne de réactions partant uniquement de la fusion de l'hydrogène. Les étoiles

primordiales avaient un cœur nucléaire plus chaud que celui des étoiles actuelles et brillaient avec une luminosité plus d'un million de fois supérieure à celle du Soleil. Leur température de surface étant de l'ordre de 100 000 degrés, elles ont émis un intense rayonnement ultraviolet qui a réionisé le gaz alentour, a détruit l'hydrogène moléculaire et a bloqué ainsi toute condensation ultérieure.

Annihilation de neutralinos

La matière noire a longtemps été considérée comme un acteur secondaire de la genèse des étoiles primordiales. Son seul rôle était d'avoir fourni, pendant l'âge sombre, des sites où le gaz stellaire s'était condensé. Ce point de vue a radicalement changé en 2007, quand on s'est rendu compte que la matière noire a peut-être servi de source de chaleur à une partie des étoiles de population III.

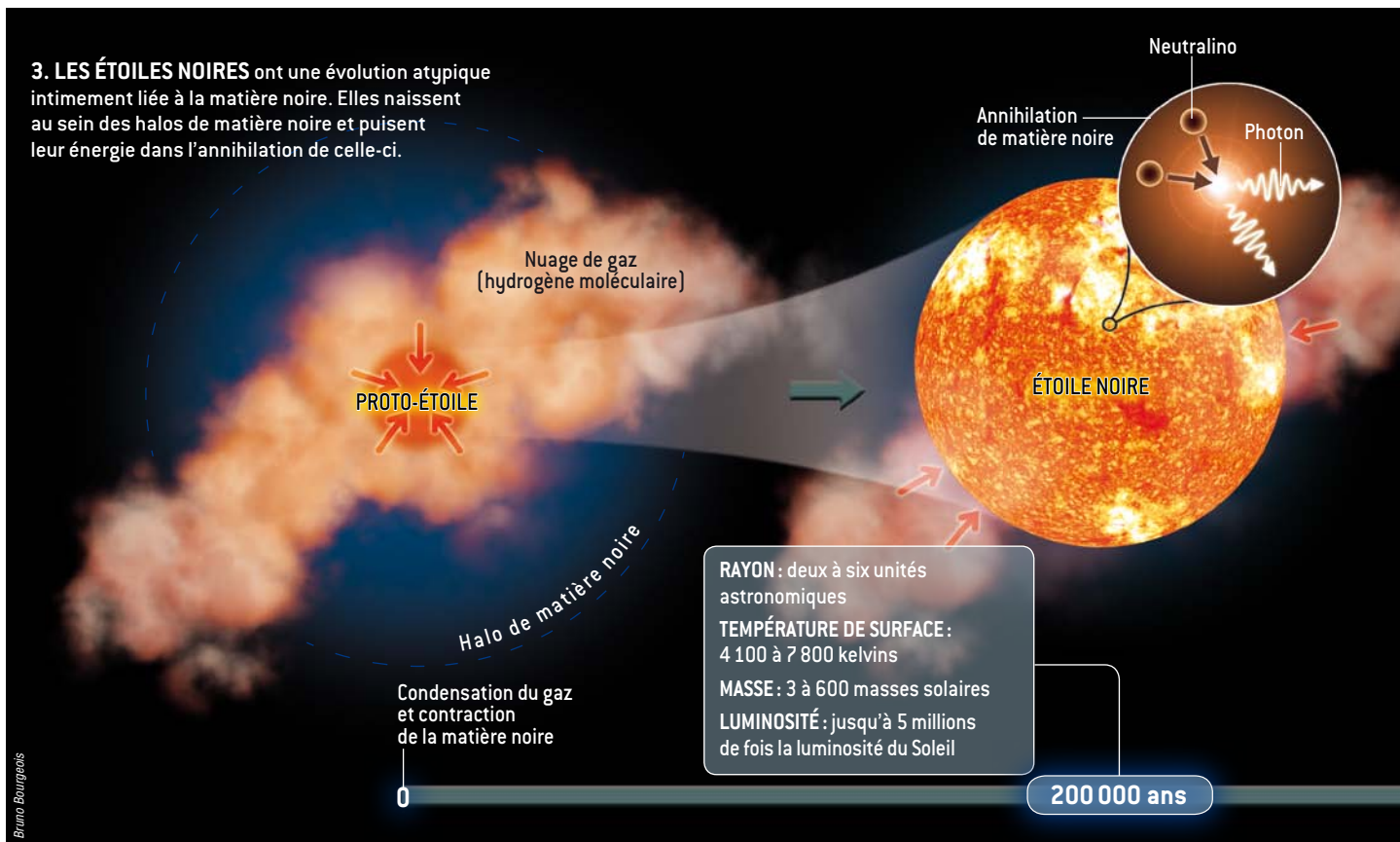
Pour comprendre ce scénario, il faut s'intéresser à une particule qui apparaît naturellement dans des extensions théoriques du modèle standard de la physique des particules : le neutralino (voir l'encadré ci-dessus). Cette particule a toutes les propriétés requises pour constituer la matière

noire : elle interagit faiblement avec la matière ordinaire et serait produite dans des quantités suffisantes pour reproduire les effets cosmologiques de la matière noire.

Une autre propriété du neutralino est d'être sa propre antiparticule. Ainsi, lorsque deux neutralinos se rencontrent, ils peuvent s'annihiler en produisant des particules ordinaires, tels des photons. La probabilité d'annihilation est plus élevée dans les régions riches en neutralinos, où les collisions sont plus nombreuses. Au cœur des étoiles de population III, l'annihilation de matière noire peut avoir servi de source d'énergie et de chaleur. Nous avons étudié le phénomène d'annihilation de neutralinos dans les étoiles primordiales et avons montré que l'évolution de ces étoiles diffère du scénario classique.

L'idée que la matière noire a eu des effets sur l'évolution des étoiles remonte à 1978. Gary Steigman et ses collègues, aux États-Unis, ont montré que si des neutralinos sont présents en grand nombre au centre d'une étoile, ils sont capables de transporter la chaleur du cœur vers la périphérie de l'astre. En 1985, Bill Press et David Spergel ont utilisé ce modèle pour expliquer le problème des neutrinos solaires. Ces particules avaient été imaginées par le physicien autrichien Wolfgang

3. LES ÉTOILES NOIRES ont une évolution atypique intimement liée à la matière noire. Elles naissent au sein des halos de matière noire et puisent leur énergie dans l'annihilation de celle-ci.



Pauli en 1930 pour assurer la conservation de l'énergie dans la radioactivité bêta. Leur existence a été confirmée en 1956. Dans les années 1960, l'Américain Raymond Davis a mesuré le flux de neutrinos provenant du Soleil. Le résultat était trois fois inférieur à celui prévu par John Bahcall, théoricien à Princeton. Ce dernier avait calculé le flux de neutrinos solaires à partir de l'analyse des réactions thermonucléaires qui produisent des neutrinos au sein de l'étoile.

B. Press et D. Spergel ont expliqué le déficit observé par Davis en invoquant les neutralinos, qui emportent une partie de l'énergie du cœur de l'étoile. Ce processus diminue la température du cœur, réduit le nombre de réactions thermonucléaires et, par conséquent, le flux de neutrinos. Cependant, ce modèle se heurtait à une autre contrainte soulignée par l'un de nous (K. Freese) : comme les neutralinos s'annihilent entre eux, ils ne réduiraient pas assez le flux de neutrinos.

L'hypothèse des neutralinos pour résoudre le problème des neutrinos solaires est aujourd'hui obsolète. On sait désormais que les neutrinos, qui existent sous trois types, peuvent passer d'un type à l'autre, phénomène nommé oscillation. Le résultat

de Davis s'explique par la transmutation partielle des neutrinos de type électronique en une autre espèce de neutrinos au cours de leur voyage du Soleil à la Terre.

Néanmoins, l'idée que la matière noire pouvait altérer les scénarios standards d'évolution stellaire a inspiré de nombreux travaux. En 1989, l'un de nous (P. Salati) et Joseph Silk, de l'Université de Berkeley, ont établi que certaines étoiles immergées dans une région où la matière noire est dense – par exemple au centre des galaxies – produiraient tellement d'énergie qu'elles gonfleraient et deviendraient des géantes rouges.

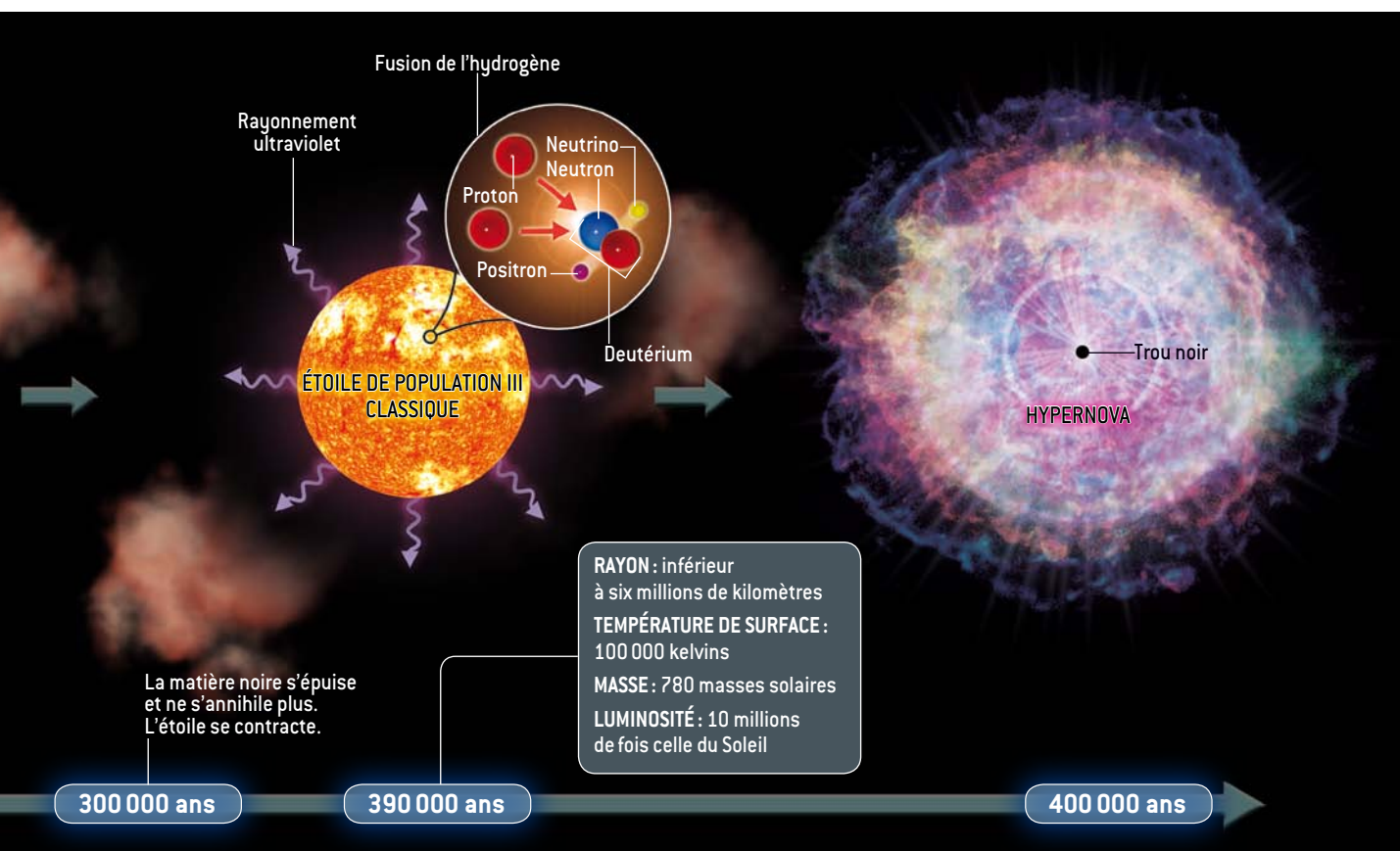
Cependant, toutes ces analyses reposaient sur des probabilités relativement élevées de collision entre un neutralino et un noyau au cœur de l'étoile. Or, aujourd'hui, les expériences dites de détection directe, qui cherchent précisément ce type de collisions sur Terre, excluent les valeurs de probabilités d'interaction nécessaires. Autrement dit, les effets stellaires des neutralinos semblaient si négligeables que le sujet est tombé en désuétude pendant une vingtaine d'années. Toutefois, deux d'entre nous (K. Freese et P. Gondolo) et Douglas Spolyar, de l'Université de Santa Cruz, le réexaminèrent en 2007 sous un jour nouveau.

L'idée était d'étudier des régions susceptibles d'héberger des étoiles et où la densité de matière noire est forte. La piste que nous avons explorée a été de regarder dans le passé, lorsque la densité de l'Univers, donc la concentration de matières baryonique et noire, était plus élevée qu'aujourd'hui.

Des germes pour les premières étoiles

À la fin de l'âge sombre, la densité moyenne de la matière noire était 8 000 fois plus élevée. Les premières structures formées par la matière noire étaient des halos 200 fois plus denses encore, ayant une masse d'un million de fois celle du Soleil et un rayon de l'ordre de 300 années-lumière. Un tel halo offrit un site privilégié pour la formation des premières étoiles, le gaz de matière baryonique environnant y étant fortement attiré.

Les calculs hydrodynamiques effectués en 2001 par Tom Abel, au Centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian aux États-Unis, et ses collègues, montrèrent qu'au centre d'un tel nuage de gaz froid, un cœur d'une centaine de masses solaires a commencé à se condenser, entraînant dans sa chute une partie du reste du nuage. La remarque



cruciale que nous avons faite en 2007 est que la condensation du gaz, déclenchée par la matière noire, a agi à son tour sur cette dernière. À mesure que le cœur protostellaire se formait, le champ gravitationnel central est devenu plus intense et a attiré progressivement les neutralinos vers l'intérieur, pendant que la masse du cœur augmentait.

Ce processus est la clef de l'existence des étoiles noires. Il repose sur la dynamique gravitationnelle de Newton et ne présuppose rien des propriétés intrinsèques de la matière noire. Il est possible d'obtenir un cœur de proto-étoile riche en matière noire à condition que la contraction soit adiabatique, c'est-à-dire suffisamment lente pour que les neutralinos réagissent de façon appropriée aux modifications du champ gravitationnel (la contraction adiabatique est bien vérifiée dans les simulations numériques). Si le gaz se condensait trop rapidement, des trajectoires initialement circulaires deviendraient elliptiques. La densification de la matière noire serait moins efficace, car les particules passeraient une partie de leur temps très loin du centre de la proto-étoile.

À ce stade, le cœur de la proto-étoile serait devenu riche en matière baryonique

et en matière noire. La production d'énergie se serait amorcée. Dans le scénario classique de l'évolution d'une étoile, il s'agit de réactions de fusion thermonucléaire. Dans le cas des étoiles noires, c'est l'annihilation des neutralinos qui est à l'œuvre. Un tiers de l'énergie produite aurait été emportée par des neutrinos qui se sont échappés de l'étoile. Le reste se serait partagé entre photons, électrons et positrons qui ont produit de nouvelles particules et ont perdu progressivement leur énergie au sein du gaz, suffisamment dense pour les arrêter. Cette énergie aurait constitué une source de chaleur pour l'étoile en formation.

Une étoile noire est née

L'importante densité en neutralinos s'est traduite par une forte production d'énergie, qui a maintenu la température de l'étoile autour de 1000 kelvins, la luminosité de l'astre étant équivalente à 140 fois celle du Soleil. Le cœur a cessé alors de se condenser. Il s'est alors comporté comme un objet stellaire qui rayonne, mais dont la particularité était que l'énergie provenait de l'annihilation des neutralinos. Une étoile noire venait de naître – noire non pas parce qu'elle ne brillait

pas, bien au contraire, mais parce que sa source d'énergie était de la matière noire.

Pendant une grande part de sa vie, l'étoile a accumulé de la matière, ordinaire et noire, tandis que se poursuivait l'annihilation de neutralinos jusqu'à leur épuisement dans l'environnement de l'astre. Il est cependant possible de distinguer plusieurs étapes dans cette évolution.

Au début, la proto-étoile s'est contractée sous l'influence gravitationnelle de la matière. Lorsque l'annihilation est devenue importante, la pression de radiation exercée par la lumière a ralenti cette contraction. Le gaz environnant a continué de tomber vers l'astre à un rythme qui a évolué d'un centième à un millième de masse solaire par an au cours de la vie de l'astre.

Sous cette pluie d'hydrogène, l'objet est devenu plus lourd et la contraction a repris peu à peu. Après 100 ans, il avait une masse égale à trois fois celle du Soleil et un rayon de deux unités astronomiques. Sa luminosité était égale à 45 000 fois celle du Soleil et sa température de surface atteignait 4 100 kelvins. L'astre fonctionnait comme une étoile en équilibre thermique et hydrostatique. Ce stade est considéré comme l'instant initial de la phase noire.



MUSKES/A. Fruchter et al. / WFPZ/HST

4. LE PHÉNOMÈNE DE LENTILLE GRAVITATIONNELLE se matérialise par la déformation d'images d'objets brillants – des étoiles ou, comme ici, des galaxies – qui prennent la forme d'arcs. Le trajet de la lumière est dévié par la présence d'un objet massif situé entre la source et l'observateur. Cet effet peut amplifier la luminosité d'un objet très éloigné – par exemple une étoile noire.

La pression de radiation était désormais assez intense pour bloquer la contraction de l'étoile, dont le rayon et la masse ont augmenté par accumulation de matière. Au bout de 19 000 ans dans la phase noire, l'astre a atteint une centaine de masses solaires et une température de surface de 5 800 kelvins. L'étoile émettait un rayonnement électromagnétique dont le spectre était semblable à celui du Soleil, mais avec une luminosité un million de fois supérieure.

Température modérée, mais forte luminosité

Alimentée par la fusion thermonucléaire centrale, une étoile classique a un cœur porté à 200 millions de kelvins, un rayon de cinq millions de kilomètres et, surtout, une température de surface de 100 000 kelvins. Pour une même masse, le cœur d'une étoile noire est resté relativement froid, à une température d'à peine 400 000 kelvins. L'astre n'émettait pas non plus de rayonnement ultraviolet intense et ne détruisait pas les molécules du nuage de gaz qui l'entourait.

Pendant 200 000 ans, la masse de l'étoile noire a continué de croître, tout comme sa luminosité, sa température de surface et son rayon, qui a atteint un maximum de six unités astronomiques. L'augmentation de sa masse a entretenu une contraction adiabatique sur le nuage de neutralinos

aux alentours, de sorte que de la matière noire était captée en continu et servait de carburant à l'étoile. C'est à ce stade que les réserves d'énergie étaient les plus hautes. Mais, petit à petit, elles se sont épuisées.

Il faudra attendre encore 100 000 ans pour que l'étoile noire atteigne 720 masses solaires. Son alimentation par l'annihilation des neutralinos s'est alors achevée et l'astre a entamé sa métamorphose. Sa luminosité n'a cependant pratiquement pas varié. Perdant toujours de l'énergie, fournie en moindre quantité par la matière noire, l'étoile a commencé à se contracter. Son rayon est devenu inférieur à une unité astronomique.

Pour évacuer à travers une surface plus petite l'énergie produite, la température a augmenté et a atteint 23 000 kelvins. Le cœur de l'objet s'est réchauffé fortement : la température y est passée à 15 millions de kelvins et le deutérium est entré en fusion pendant 50 000 ans. Toutefois, cela n'a pas suffi à stabiliser l'étoile, qui a continué de se contracter. Quand la source d'énergie formée par les neutralinos fut définitivement remplacée par la contraction gravitationnelle, le reste de matière noire a flambé une dernière fois et a produit, pendant 20 000 ans, un sursaut de luminosité. Mais l'étoile a continué à se contracter et les températures de cœur et de surface ont augmenté. L'intense rayonnement ultraviolet qui en a résulté

a détruit l'hydrogène moléculaire du gaz environnant, qui cessa d'alimenter l'étoile.

La fusion thermonucléaire de l'hydrogène s'est déclenchée et a alimenté en énergie l'astre, qui n'avait désormais plus rien de noir : il n'y avait plus d'annihilation de matière noire en son sein. L'astre s'est transformé en étoile de population III classique, mais de masse bien supérieure à celle de ses congénères – 780 masses solaires contre une centaine pour les étoiles de population III ordinaires. Son rayon était de six millions de kilomètres, seulement huit fois celui du Soleil. Et les températures de surface et de cœur étaient respectivement de 100 000 et 300 millions de degrés. La phase noire, qui s'est étalée sur 400 000 ans, venait de s'achever.

Les étoiles de population III, du fait de leur masse importante, ont eu une vie brève. Elles ont consommé rapidement l'hydrogène. Après quelques millions d'années, elles ont pu exploser en hypernova – d'une puissance équivalente à celle d'une centaine de supernovae. Elles ont laissé en leur cœur un trou noir et ont éjecté de grandes quantités de matière qui ont constitué de nouvelles étoiles ordinaires.

Comment les observer ?

Pour confirmer le scénario que nous avons décrit, il est nécessaire d'observer des étoiles noires. Or ces astres sont situés à des distances cosmologiques. Le télescope spatial *James Webb* (JWST pour *James Webb Space Telescope*), que la NASA projette de lancer en 2018, pourrait les traquer. En plus du visible, le télescope est sensible à l'infrarouge. L'une de ses caméras couvre les longueurs d'onde comprises entre 0,6 et 5 micromètres. Or le pic de luminosité d'une étoile noire dont la température de surface est de 20 000 kelvins se situe vers 0,15 micromètre de longueur d'onde. Ce rayonnement ultraviolet est décalé vers le rouge en raison de l'expansion de l'Univers et serait détecté sur Terre avec une longueur d'onde de 1,5 à 3 micromètres.

En 2010, l'un de nous (P. Gondolo), Erik Zackrisson, de l'Université de Stockholm, et leurs collègues ont montré que la luminosité de ces objets, bien que dix millions de fois plus brillants que le Soleil, serait trop atténuée pour être détectable directement. Ils ont suggéré qu'une lentille gravitationnelle, tel un amas de galaxies, interposée entre une étoile noire et la Terre, résoudrait la difficulté. Au voisinage de l'amas, l'espace est courbé, ce qui dévie les rayons lumineux de l'étoile

noire passant à proximité. En concentrant la lumière vers l'observateur, la lentille amplifie la luminosité de la source. Il deviendrait alors possible d'observer les étoiles noires situées derrière l'amas, malgré la distance.

La probabilité de détecter une étoile noire dépend de la quantité de ces astres pendant l'âge sombre. Si les conditions de formation ont été propices, la fraction d'étoiles de population III passées par la phase noire serait élevée. Mais dans ce cas, le processus de réionisation serait à revoir. Lors de la réionisation, les étoiles de population III ont émis un fort rayonnement ultraviolet qui a détruit l'hydrogène moléculaire et empêché la condensation du gaz. Si les étoiles noires ont été nombreuses, le rayonnement ultraviolet a été moins intense et la condensation du gaz s'est poursuivie plus tardivement dans l'histoire de l'Univers.

La forme du halo de matière noire peut avoir des conséquences sur l'observation. Si le halo n'est pas sphérique mais triaxial, on montre que les neutralinos suivent des orbites chaotiques qui nourrissent sans cesse

■ BIBLIOGRAPHIE

E. Zackrisson *et al.*, **Finding high-redshift dark stars with the James Webb Space Telescope**, *Astrophysical Journal*, vol. 717, pp. 257-267, 2010.

K. Freese *et al.*, **Supermassive dark stars : detectable in JWST**, *Astrophysical Journal*, vol. 716, pp. 1397-1407, 2010.

D. Spolyar *et al.*, **Dark stars : a new look at the first stars in the Universe**, *Astrophysical Journal*, vol. 705, pp. 1031-1042, 2009.

F. Iocco, **Dark matter capture and annihilation on the first stars : preliminary estimates**, *Astrophysical Journal*, vol. 677, pp. L1-L4, 2008.

D. Spolyar *et al.*, **Dark matter and the first stars : a new phase of stellar evolution**, *Physical Review Letters*, vol. 100, 051101, 2008.

la région centrale. L'étoile, jamais à court de matière noire, peut alors atteindre des masses de plusieurs millions de masses solaires, et une luminosité un milliard de fois supérieure à celle du Soleil. Les observations de la sonde WMAP imposent le nombre de ces étoiles noires géantes que le télescope *James Webb* devrait être capable de détecter directement.

D'ici quelques années, les étoiles noires ne seront peut-être plus uniquement un sujet théorique et spéculatif. Elles seront utilisées pour la recherche de la matière noire, en complément des études au LHC (le Grand Collisionneur de hadrons à Genève) et des expériences de détection directe et indirecte. Ces astres permettraient aussi de résoudre l'énigme des trous noirs de plusieurs milliards de masses solaires qui peuplent le centre de certaines galaxies primordiales. Comme les étoiles noires finissent leur vie sous la forme de trous noirs de milliers à plusieurs millions de masses solaires, ces derniers pourraient être les briques élémentaires qui, en fusionnant, ont formé les trous noirs supermassifs. ■

Restez en contact avec l'actualité scientifique.

■ POUR LA
SCIENCE
www.pourlascience.fr



Rejoignez-nous sur Facebook
<http://bit.ly/pls-facebook>



Suivez-nous sur Twitter
<http://twitter.com/PourlaScience>



Abonnez-vous à nos flux RSS
<http://bit.ly/pls-rss>



Recevez nos lettres d'information
<http://bit.ly/pls-newsletters>



Visitez notre site Internet
<http://www.pourlascience.fr>

Des jardins mauresques à la Renaissance

Felix Arnold

L'étude archéologique d'une villa de l'époque califale, près de Cordoue, suggère que la conception des jardins orientaux a influencé celle des jardins d'agrément de la toute première Renaissance italienne, où se concrétisent des idées humanistes.



Quand Jean de Gorze, l'envoyé du roi de Francie orientale auprès du calife, parvient à Cordoue en 950, il est stupéfait, mais désapprobateur. La splendide capitale du royaume hispano-arabe Al-Andalus arbore en effet des rues pavées, des bains publics, une poste, des jardins... autant d'expressions, selon lui, de la coupable sensualité païenne. Tous les Européens ne réagissent cependant pas ainsi: vers 967, Gerbert d'Aurillac, le futur pape Sylvestre II, se rend en Espagne afin d'y profiter des écrits astronomiques et mathématiques des savants arabes, ce qui fit de lui plus tard le promoteur des «chiffres arabes» en Europe. La civilisation arabo-musulmane était alors à son apogée.

Parce qu'elle est européenne, *Qurtuba*, c'est-à-dire Cordoue, était l'un des hauts

lieux de transmission du savoir musulman au monde chrétien, transmission qui s'opérait aussi dans les villes espagnoles reconquises par les princes chrétiens, telles Tolède ou Séville. La bibliothèque de Cordoue contenait des dizaines de milliers de manuscrits, dont des traductions arabes d'œuvres antiques, réalisées à Bagdad, qui donnaient accès au savoir oublié de l'Antiquité. C'est grâce à une traduction latine des œuvres d'Aristote, réalisée à Cordoue et parvenue à Paris, que Thomas d'Aquin créa la scolastique, à l'origine de la philosophie médiévale.

Cordoue attirait et produisait donc des intellectuels de toutes confessions: le médecin juif Moïse Maïmonides et le philosophe musulman Averroès y sont tous les deux nés; le second y a aussi mené

ses recherches philosophiques. Outre cette influence sur la pensée, les usages cordouans ont sans doute eu un impact sur d'autres pans de la culture européenne. Comme nous pensions que l'art du jardin d'agrément en fait partie, nous avons étudié de près les restes du parc privé de la villa de l'un des ministres du Calife. Sa disposition se révèle pour l'essentiel similaire à celle d'un jardin d'agrément florentin ou romain du XV^e siècle, ce qui suggère bien une influence.

L'art des jardins qui se pratiquait dans l'Espagne musulmane avait été importé d'Orient et d'Afrique du Nord. Les parcs et jardins se trouvaient en général près des palais, des maisons de maître et des riches villas des alentours de la ville. Comme tous les jardins orientaux, ils