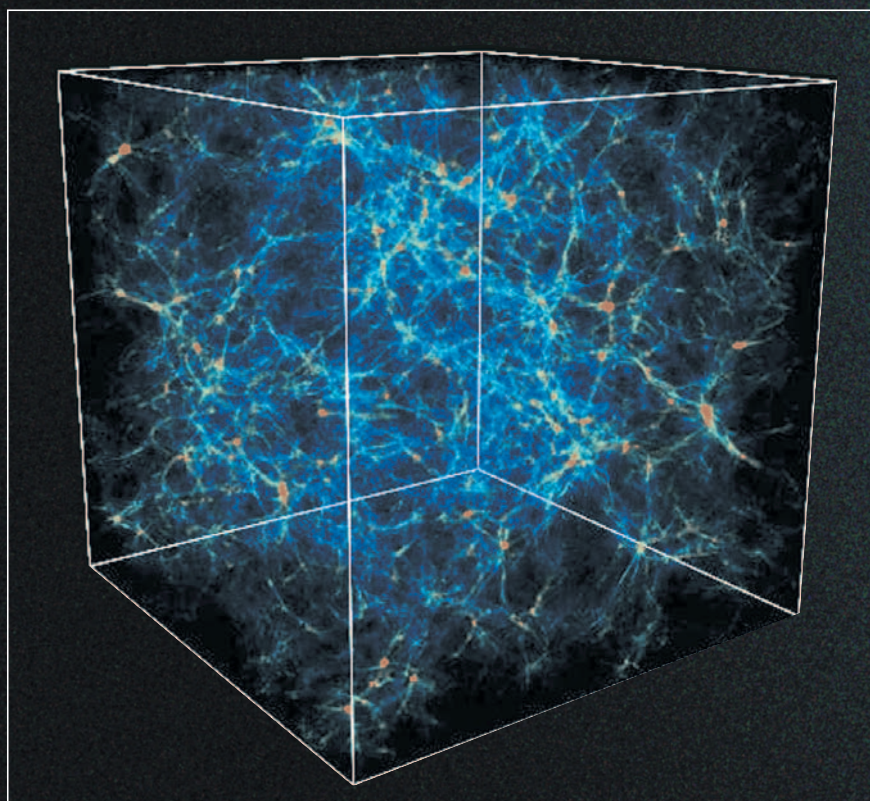


Le côté obscur

DAVID CLINE

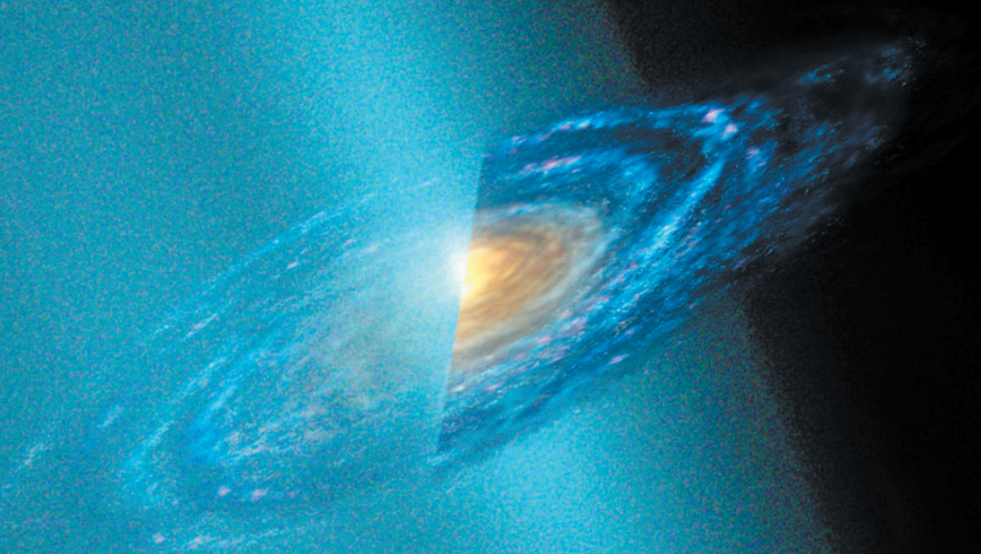
La matière sombre s'est d'abord manifestée à l'échelle cosmique, mais nous ne comprendrons vraiment sa nature que lorsque nous réussirons à l'isoler dans nos laboratoires terrestres.



G.L. Bryan/M.L. Norman/UUC/NCSA/GC3

1. SI NOUS POUVIONS VOIR LA MATIÈRE NOIRE, nous ne reconnâtrions pas la Voie lactée (page de droite). Le disque spiralé qui nous est familier et qui contient la plupart des étoiles est, en réalité, enveloppé d'un épais brouillard de particules de matière noire. Les astronomes pensent que ce brouillard dense est dix fois plus massif que le disque, et presque dix fois plus grand. Toutefois, leurs mesures sont assez peu précises. Nous sommes cependant convaincus que la matière noire existe, à la fois parce qu'elle se manifeste dans le mouvement des étoiles de la galaxie, et parce que sa présence est déduite des simulations (*ci-dessus*) de formation des galaxies à partir des fluctuations de densité du plasma primordial.

de la matière



Don Dixon

Tels les navigateurs de l'Antiquité découvrant que la Terre est ronde, notre génération s'aperçoit que le monde n'est pas une simple extrapolation de l'image familière que nous en donne notre voisinage. À l'échelle cosmique, l'Univers est dominé par une substance étrange et invisible. Ce que nous voyons, les étoiles, les nuages de gaz et de poussières et toute la matière ordinaire représentent moins de cinq pour cent de sa masse totale : étoiles et galaxies ne sont que des débris ballottés par les flots d'une mer invisible. Nous savons très peu de choses sur ce mystérieux océan. De surcroît, il y a quatre ans, on a découvert que cette nouvelle substance ne constitue qu'un tiers de la masse totale du cosmos, les deux autres tiers étant faits d'une nouvelle forme d'énergie. Les termes que nous employons pour désigner ces deux constituants principaux de l'Univers, la matière noire et l'énergie sombre, reflètent hélas notre ignorance de leur nature exacte.

Depuis 70 ans, les astronomes accumulent des preuves de l'existence de la matière noire, notamment en analysant le mouvement des étoiles dans les galaxies spirales ou celui des galaxies dans les amas et les superamas. Cependant, ces preuves sont indirectes et ne permettent pas de rejeter définitivement les autres hypothèses, telles que la modification des lois de la physique aux échelles cosmiques, par exemple. Par ailleurs, les observations ne nous renseignent pas beaucoup sur les propriétés de l'hypothétique matière noire. Tout ce que nous savons, c'est que la matière noire forme des grumeaux où s'ancrent les galaxies et autres grandes structures du cosmos (les amas et les superamas de galaxies), mais qu'elle ne saurait se condenser en astres plus compacts, étoiles ou planètes. Elle est vraisemblablement constituée de particules élémentaires d'un type encore inconnu. Quant à l'énergie sombre, substance distincte ajoutée au tableau en 1998, elle serait uniformément répartie dans l'espace et expliquerait l'accélération de l'expansion universelle. Désormais, il revient à la physique des particules, et non plus seulement à l'astronomie, d'établir dans le détail la vraie nature de ces substances

étranges. Depuis huit ans, les deux disciplines ont mis en commun leurs ressources afin d'inventer et de mettre en œuvre de nouveaux outils capables de détecter et d'étudier la matière noire en s'inspirant des techniques qui se sont révélées si fructueuses pour l'analyse de particules ordinaires. Plutôt que d'étudier indirectement la matière noire en observant des objets lointains, nous voulons désormais la traquer sur Terre.

La recherche des particules de matière noire est l'une des expériences de physique les plus difficiles jamais entreprises (la recherche des particules d'énergie sombre est encore moins envisageable, et les chercheurs y ont renoncé, du moins pour l'instant). Pourtant, de notables progrès ont été réalisés. En 1994, lors du premier symposium sur ce sujet, physiciens et astrophysiciens exprimaient leur incrédulité quant à la possibilité d'observer un jour de la matière noire grâce à un détecteur de particules installé sur la Terre. Aujourd'hui, la sensibilité des détecteurs a été multipliée par 1 000 et un nouveau facteur 1 000 sera peut-être bientôt atteint par les constructeurs d'instruments. Ces détecteurs ont franchi le seuil minimal de sensibilité à partir duquel la détection des particules pressenties pour constituer la matière sombre devient envisageable. Nous saurons alors si elle existe vraiment, ou si, au contraire, nous devons bouleverser les théories sur lesquelles repose la physique moderne.

De l'autre côté du miroir

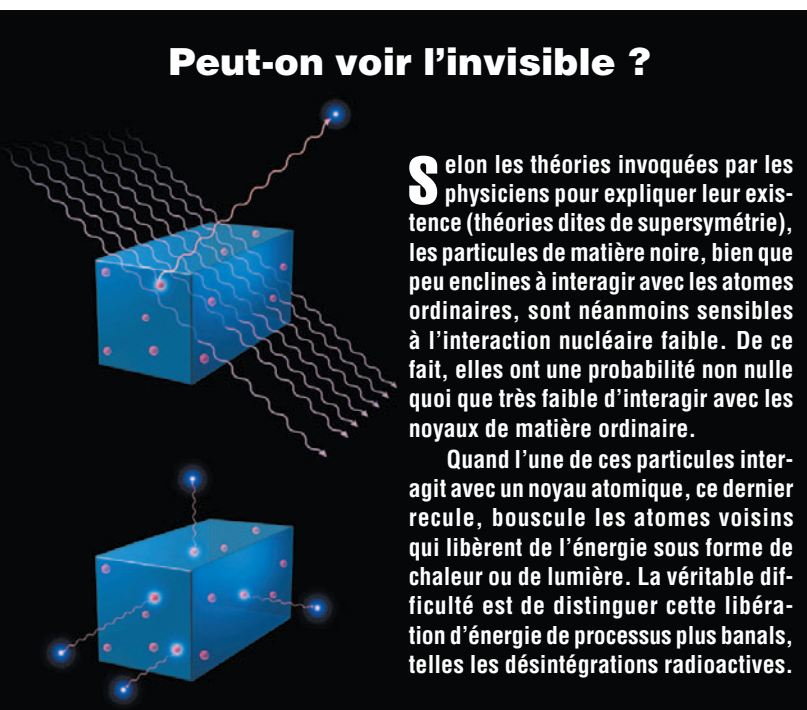
Que savons-nous pour le moment des particules qui constituent la matière noire ? Les observations astronomiques nous donnent quelques pistes. Il ne peut s'agir de matière « baryonique », c'est-à-dire de protons, de neutrons, ni de quoi que ce soit qui ait été autrefois constitué de protons ou de neutrons, telles des étoiles massives qui seraient devenues des trous noirs. En effet, la théorie du Big Bang établit de façon assez précise la quantité de matière baryonique qui était présente dans les premières minutes de l'histoire cosmique : cette matière participa à la « nucléosynthèse primordiale », c'est-à-dire aux réactions de fusion nucléaire qui, avant même l'existence des étoiles, produisirent les premiers éléments chimiques du tableau périodique. Or, les quantités d'hélium, de deutérium et de lithium qui ont été produites de cette façon sont connues assez précisément et elles indiquent qu'il n'y a jamais eu assez de matière baryonique pour constituer toute la masse de l'Univers. Par ailleurs, les particules de matière sombre doivent être électriquement neutres, sinon, elles seraient sensibles à la force électrique, elles interagiraient fortement avec les protons et les électrons dans la matière ordinaire, elles pourraient rayonner des ondes électromagnétiques (de la lumière) : bref, elles perdraient leur proverbiale discrétion.

Les neutrinos, distincts des baryons, électriquement neutres et peu enclins à interagir avec la matière ordinaire ont longtemps constitué des candidats de choix. Malheureusement, la masse qu'on leur attribue depuis peu est trop faible pour qu'ils constituent une fraction significative de la matière noire. On estime que la contribution des neutrinos est du même ordre de grandeur que celle des étoiles. De plus, précisément à cause de leur faible masse, la vitesse moyenne des neutrinos était très élevée aux premiers temps de l'Univers. On les qualifie

Peut-on voir l'invisible ?

Selon les théories invoquées par les physiciens pour expliquer leur existence (théories dites de supersymétrie), les particules de matière noire, bien que peu enclines à interagir avec les atomes ordinaires, sont néanmoins sensibles à l'interaction nucléaire faible. De ce fait, elles ont une probabilité non nulle quoi que très faible d'interagir avec les noyaux de matière ordinaire.

Quand l'une de ces particules interagit avec un noyau atomique, ce dernier recule, bouscule les atomes voisins qui libèrent de l'énergie sous forme de chaleur ou de lumière. La véritable difficulté est de distinguer cette libération d'énergie de processus plus banals, telles les désintégrations radioactives.



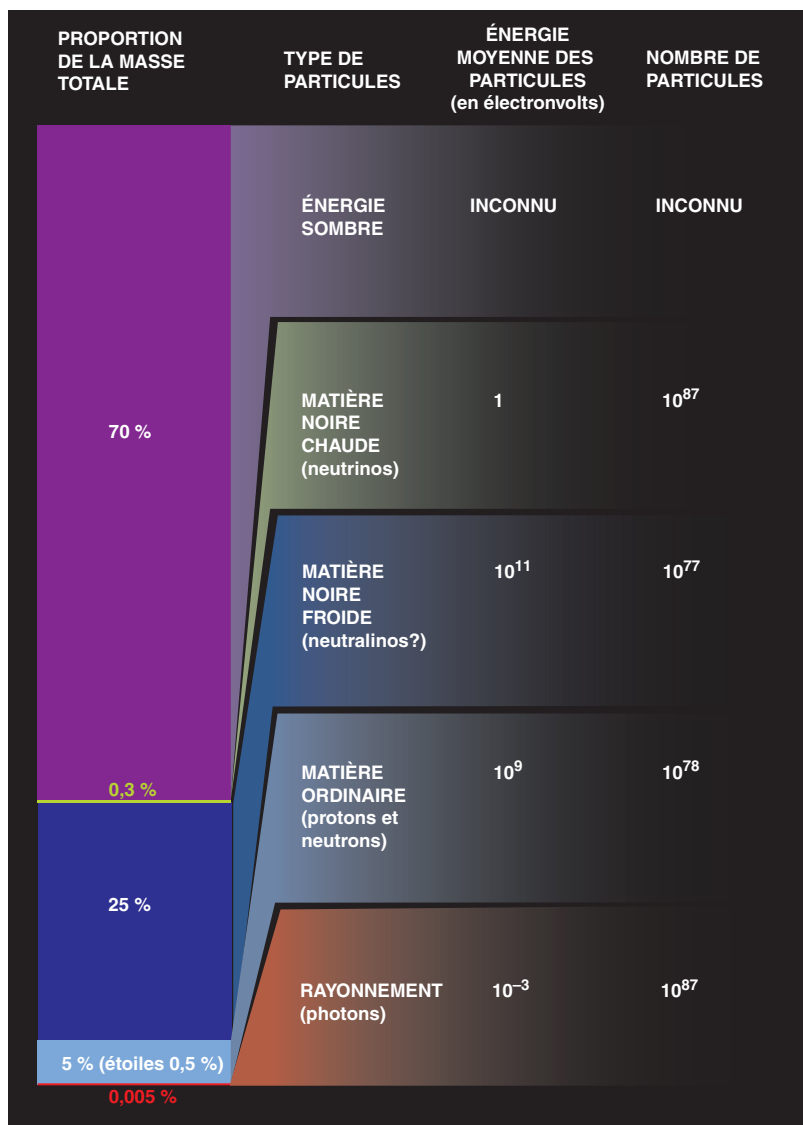
pour cela de « matière noire chaude ». Or, si l'essentiel de la matière noire avait été chaud, il aurait dispersé les grumeaux du plasma primordial qui ont, depuis, formé les galaxies et les amas de galaxies. Il faut donc que la majeure partie de la matière noire soit « froide » (c'est-à-dire que la vitesse moyenne des particules de matière noire ait été notablement inférieure à celle de la lumière aux premiers temps de l'histoire cosmique).

Ainsi, physiciens et astrophysiciens recherchent une particule non baryonique, électriquement neutre, c'est-à-dire ressemblant un peu au neutrino, mais beaucoup plus lente et massive. Leur problème est que le modèle standard de la physique des particules élémentaires ne prévoit rien de ce genre. Heureusement, certaines extensions du modèle standard, développées pour des raisons tout à fait indépendantes des besoins de l'astronomie, offrent, elles, de nombreux candidats plausibles. Parmi ces extensions, la plus étudiée étant, de loin, la supersymétrie, nous allons l'examiner de plus près.

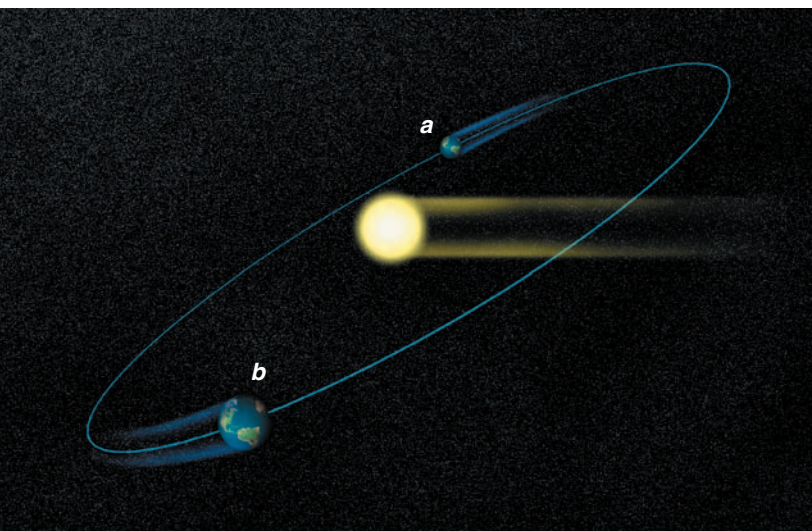
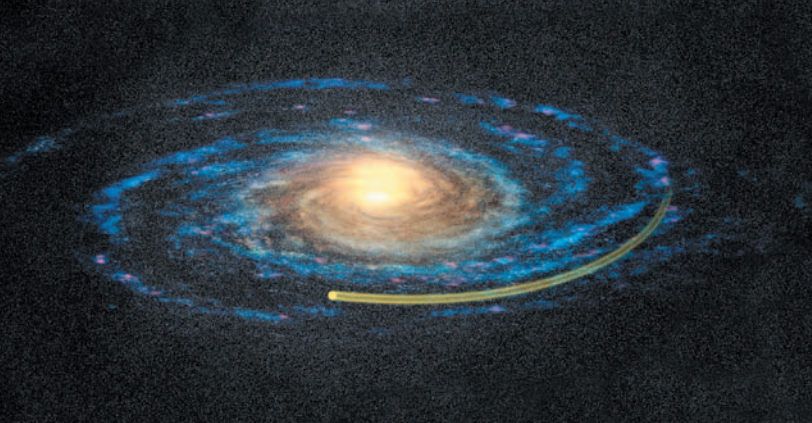
Les physiciens des particules postulent l'existence d'une nouvelle symétrie dans la nature, la supersymétrie, qui associe à chaque particule de spin entier (ou boson) une particule de spin demi-entier (ou fermion), et réciproquement. Chaque particule connue étant ainsi dotée d'une « superpartenaire », la supersymétrie postule l'existence de particules entièrement nouvelles, ce qui la rend particulièrement attrayante pour les chasseurs de matière noire. De plus, d'après la théorie, les superpartenaires sont toutes plus lourdes que les particules connues et plusieurs rassemblent les caractéristiques que l'on attribue à la matière noire froide. Celle qui retient le plus l'attention est le neutralino, un fermion superpartenaire à la fois du photon (boson qui transmet la force électromagnétique) et du boson Z^0 (qui transmet une interaction nucléaire dite « faible »). Remarquons que le nom de neutralino est assez malheureux, car il ressemble à « neutrino », bien que ces deux particules n'aient aucun lien de parenté (même si elles partagent superficiellement quelques propriétés). Le neutralino est plus lourd que toutes les particules connues, mais c'est la plus légère des particules supersymétriques. Pour cette raison, le neutralino est nécessairement stable : une superparticule instable se désintègre en deux superparticules plus légères, ce qui est impossible pour le neutralino. Outre sa masse importante et sa charge électrique nulle, cette stabilité est une raison supplémentaire pour en faire la cible privilégiée des chasseurs de matière noire.

Dans le cadre du modèle du Big Bang, on sait estimer le nombre de neutralinos qui ont été créés à l'intérieur du plasma primordial, au tout début de l'histoire cosmique. Ce plasma était une soupe brûlante constituée de tous les types de particules. Aucune particule n'y survivait longtemps : elle entraînait en collision avec une autre particule et produisait de nouvelles entités, elles-mêmes vouées à de très brèves existences. Ainsi, par exemple, la collision de deux photons pouvait produire un électron et un positon, qui, chacun, n'allaient pas tarder à rencontrer dans la foule leur antiparticule, restituant alors leur énergie de masse sous la forme de photons semblables à ceux qui leur avaient donné naissance. À un instant donné, ces destructions et ces créations s'équilibraient et le nombre moyen de particules de chaque espèce était fixé. Toutefois, tandis que le plasma se diluait et se refroidissait, la probabilité des

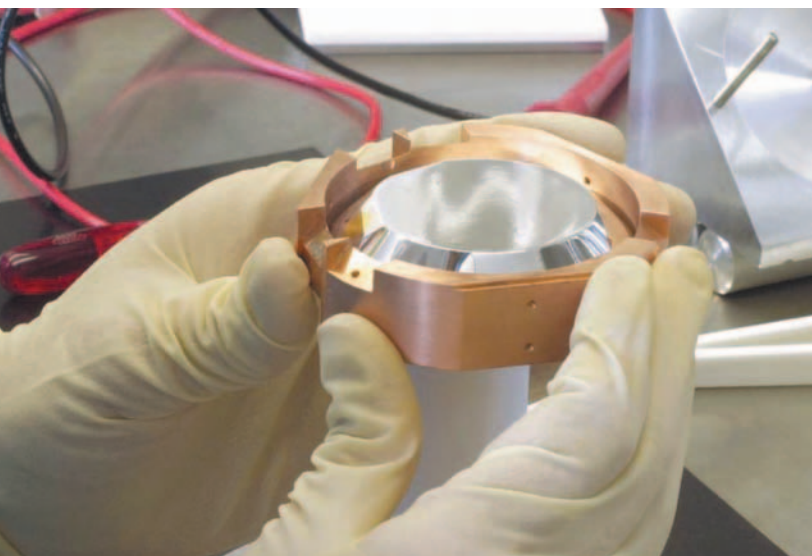
collisions et leur énergie diminuaient. Ainsi, par exemple, il vint un moment où l'énergie moyenne des photons n'était plus suffisante pour produire des paires électrons-positons : les créations ne compensaient plus les destructions et ces paires se sont annihilées mutuellement. Les électrons que nous connaissons aujourd'hui sont les rares survivants de l'hécatombe qui a suivi ce « découplage » des électrons vis-à-vis du plasma primordial. Les neutralinos étant beaucoup plus massifs que les électrons et leur probabilité d'interaction avec d'autres particules étant beaucoup plus faible,



2. COMPOSITION DE LA MASSE totale de l'Univers, telle qu'elle apparaît aujourd'hui aux astrophysiciens. Les étoiles et la matière visible ne constituent que 0,5 pour cent du total. Le nombre de baryons (les protons et les neutrons) de l'Univers peut être déduit des abondances relatives des éléments légers (deutérium, hélium, lithium) synthétisés au cours des premières minutes de l'histoire cosmique : ces calculs montrent que la matière ordinaire (baryonique) ne représente que cinq pour cent de la masse totale du cosmos. Quant aux neutrinos (en vert), leur faible masse limite leur contribution à quelques dixièmes de pourcent. On en déduit qu'il existe d'énormes quantités de matière noire (dite froide), ce qui est confirmé par les modèles de formation des galaxies. Récemment, les astrophysiciens ont découvert que l'expansion universelle accélère, et que la géométrie de l'espace est quasi euclidienne : ils en déduisent une densité de masse-énergie telle qu'elle nécessite, en plus de la matière noire, la présence de 70 pour cent d'une substance encore plus mystérieuse, l'énergie sombre.



3. UN VENT DE PARTICULES de matière noire devrait résulter du déplacement de la Terre dans l'espace. La matière noire est essentiellement un gaz stagnant (les particules ont un mouvement aléatoire, sans aucune organisation), et notre Système solaire se rue au travers de ce gaz à une vitesse de 220 kilomètres par seconde (en haut). À l'intérieur du Système solaire (en bas), la Terre gravite à la vitesse de 15 kilomètres par seconde, de telle sorte que ce vent contraire, dans l'hémisphère Nord, a une vitesse nette de 235 kilomètres par seconde en été (a) et de 205 kilomètres par seconde en hiver (b). Cette variation peut nous aider à distinguer la matière noire d'un bruit parasite.



4. DÉTECTEUR AU GERMANIUM utilisé dans l'expérience *Edelweiss*. Les physiciens espèrent que l'interaction d'un neutralino avec un noyau du détecteur provoquera une élévation de température et une ionisation caractéristiques détectables. Ce cristal de 320 grammes est très pur de façon à réduire le bruit dû à la radioactivité naturelle du matériau. De plus, l'expérience est placée au Laboratoire souterrain de Modane, sous le mont Fréjus, afin de limiter le flux de rayons cosmiques.

leur propre découplage s'est produit lorsque l'Univers était encore très chaud et très dense, à un stade bien plus précoce. C'est la raison pour laquelle on pense que ces particules ont été créées en très grand nombre (l'énergie moyenne disponible étant très élevée à cette époque). En fait, d'après les caractéristiques calculées du neutralino, on estime que la masse totale de ces particules correspond assez bien à celle de la matière noire dans l'Univers actuel. Cette adéquation est un nouvel argument en faveur d'une matière noire froide constituée essentiellement de neutralinos.

Discret, mais pas invisible

Pour détecter directement la matière noire, les physiciens des particules doivent faire quelques suppositions sur la manière dont elle interagit avec la matière ordinaire qui constitue leurs instruments. Du point de vue des astronomes, la matière noire ne se manifeste que par son influence gravitationnelle, la plus faible de toutes les interactions fondamentales : si tel est le cas, les physiciens n'ont aucun espoir de la détecter. Toutefois, cette hypothèse n'est probablement qu'une approximation pratique permettant aux astronomes de décrire les structures cosmiques sans se préoccuper du détail des propriétés des particules. Les théories supersymétriques, quant à elles, prédisent que les neutralinos sont sensibles à une interaction autre que la gravitation : l'interaction nucléaire faible (interaction qui a déjà « trahi » le neutrino). Ainsi, l'écrasante majorité des neutralinos qui frapperaient un mur de plomb de milliers de kilomètres d'épaisseur le traverserait sans encombre. Toutefois, à l'occasion, l'une de ces particules – extraordinairement malchanceuse – interagirait avec un noyau dans le mur de plomb et lui transférerait une petite partie de son énergie.

Bien que de tels événements aient des effets très faibles et soient très improbables, les physiciens ont bon espoir de les observer grâce au nombre gigantesque de neutralinos qui sont peut-être présents autour de nous. N'oubliez pas qu'ils sont censés constituer l'essentiel de la masse de la Voie lactée. Par ailleurs, la matière noire étant... noire, elle ne peut perdre son énergie en rayonnant, ce qui lui interdit de se condenser en grumeaux plus petits que la galaxie, telles des étoiles ou des planètes. Par conséquent, la matière noire doit constituer un gaz qui imprègne tout l'espace autour de nous. Notre Système solaire, par exemple, en orbite autour du centre de la galaxie, se déplace à la vitesse de 230 kilomètres par seconde et se fraye un chemin à travers ce gaz noir (voir la figure 3). Les astronomes prédisent qu'un milliard de particules de matière noire traversent chaque mètre carré toutes les secondes.

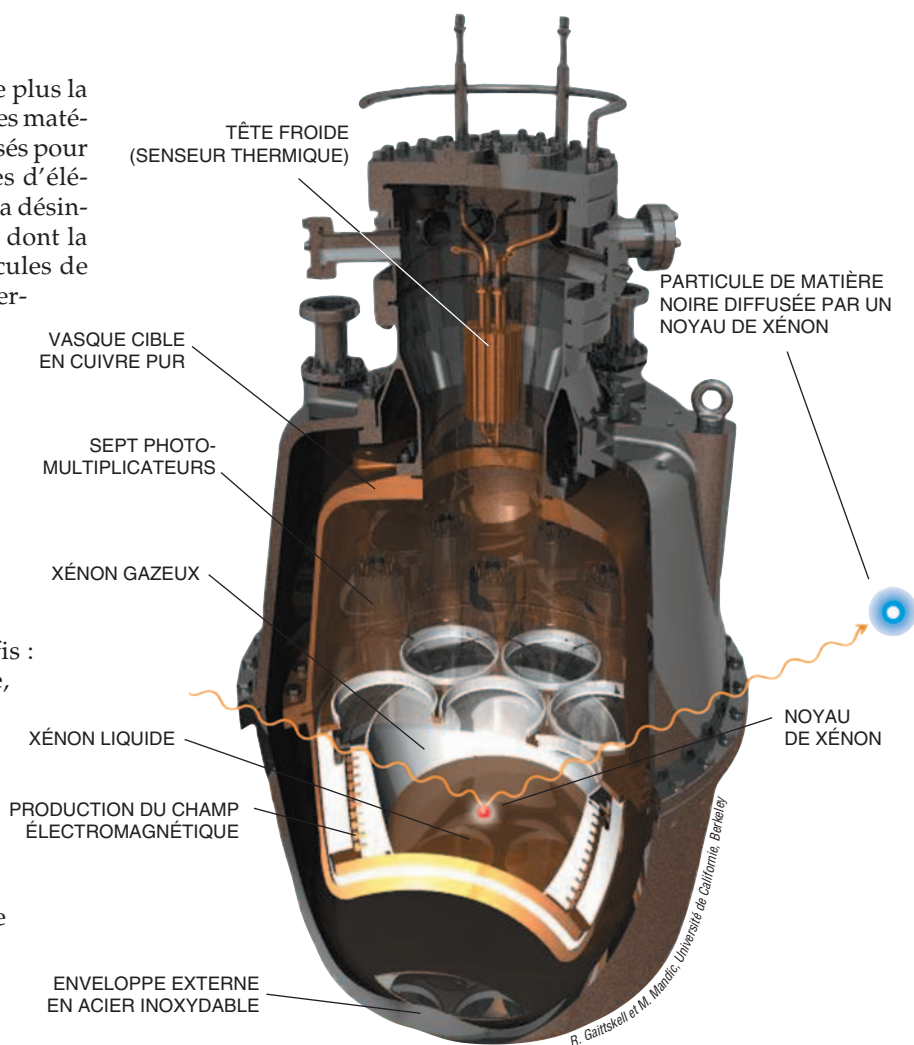
On peut établir des limites à la probabilité d'interaction des neutralinos avec la matière ordinaire à l'aide des données issues des détecteurs déjà construits et des accélérateurs de particules : puisque les neutralinos ne s'y sont jamais manifestés, ils ne sauraient interagir à un rythme supérieur à un événement par jour et par kilogramme de matière ordinaire. Leszek Roszkowski et ses collègues de l'Université de Lancaster, en Angleterre, ont récemment effectué des calculs complets fondés sur différents modèles théoriques. Leurs résultats varient entre 0,1 et 0,0001 événement par kilogramme et par jour. La sensibilité des détecteurs actuels vient de franchir la borne supérieure (0,1) de cet encadrement.

À ce stade, la difficulté principale ne concerne plus la sensibilité des détecteurs, mais leur pureté. Tous les matériaux qui constituent la Terre (y compris ceux utilisés pour construire les détecteurs), contiennent des traces d'éléments radioactifs, tels l'uranium ou le thorium. La désintégration de ces éléments produit des particules dont la signature pourrait être prise pour celle de particules de matière noire. En fait, la radioactivité naturelle terrestre est environ dix fois supérieure au signal que l'on attend de la part des neutralinos. De plus, si les détecteurs sont situés à la surface de la Terre, les rayons cosmiques produisent un signal encore dix fois plus puissant. Pour identifier des particules de matière noire, les chercheurs doivent impérativement diviser ce bruit de fond par un million.

La traque a commencé

Les physiciens sont donc confrontés à deux défis : détecter une interaction, par définition très faible, et supprimer le bruit assourdissant susceptible d'en masquer la signature. En ce qui concerne le premier défi, plusieurs propriétés de la matière peuvent être utilisées pour enregistrer le recul d'un noyau qui vient d'être frappé par un neutralino. Parmi toutes les méthodes envisageables, la plus simple est de mesurer l'échauffement qui se produit lorsqu'en reculant le noyau se fraye un chemin dans la matière qui l'entoure et lui cède de l'énergie cinétique, élevant ainsi légèrement la température du détecteur. Pour mesurer cet échauffement, il est d'abord nécessaire que le matériau soit à très basse température, de l'ordre de quelques millikelvins : c'est la température de fonctionnement des détecteurs cryogéniques. Les détecteurs cryogéniques utilisés par deux des principaux programmes de recherche, le CDMS (sigle de *Cryogenic Dark Matter Search*, recherche cryogénique de matière noire) et l'expérience française *Edelweiss* sont conçus pour mesurer des phonons isolés, ou quanta de chaleur, déposés dans une certaine quantité de matériau. Ils fonctionnent à une température d'environ 25 millikelvins et utilisent des thermistors pour enregistrer les augmentations de température dans les différentes parties du dispositif avec une précision de l'ordre de un millionième de kelvin. Les détecteurs individuels ont une masse de quelques centaines de grammes, et les chercheurs peuvent en empiler un assez grand nombre, jusqu'à atteindre une masse totale de plusieurs kilogrammes, ce qui augmente la probabilité d'enregistrer un événement.

L'autre méthode consiste à déceler l'ionisation de la matière sur le chemin du noyau propulsé par l'effet de recul après l'interaction avec un neutralino. Le noyau en mouvement arrache quelques électrons aux atomes environnants, ce qui produit des ions excités que l'on nomme « excimers » (acronyme anglais pour *excitation dimmers*, variateurs d'excitation). Par la suite, ces ions capturent un nouvel électron et retrouvent leur état normal. On cherche à mesurer les petits courants électriques (de quelques centaines d'électrons) provoqués par ces événements ou à détecter la faible lumière dite de scintillation qu'ils produisent dans certains matériaux,



5. LE DÉTECTEUR ZEPLIN II contiendra 30 kilogrammes de xénon liquide dans une enceinte maintenue à basse température. Lors d'une collision entre une particule de matière noire et un noyau de xénon, des charges seront produites par le noyau reculant sous le choc ; ces charges seront accélérées et focalisées par un champ électromagnétique. Elles provoqueront dans le xénon gazeux qui le surplombe une cascade comparable à celle d'un tube au néon. Cette scintillation sera enregistrée par sept photomultiplicateurs situés au-dessus du xénon. L'étude de la forme de l'impulsion enregistrée et la mesure de l'ionisation produite par le recul du noyau devraient permettre de distinguer un événement provoqué par une authentique particule de matière noire d'événements plus banals, tels une désintégration radioactive ou un rayon cosmique.

essentiellement des gaz rares à l'état liquide. Dans le xénon liquide, par exemple, la lumière est très intense et dure environ dix nanosecondes, de sorte qu'un photomultiplicateur peut l'amplifier jusqu'à des niveaux détectables.

Au début des années 1990, l'équipe que je dirigeais avec Hanguo Wang à l'Université de Californie, ainsi que celle de Pio Picchi à l'Université de Turin, ont développé des détecteurs à xénon dans le cadre du projet ZEPLIN. Ces instruments amplifient la lumière en introduisant une couche de gaz traversée par un champ électrique ; le champ accélère les électrons repoussés par le noyau lors de son recul, et ces électrons ionisant d'autres atomes du gaz créent une avalanche de particules plus aisément détectable. À terme, il devrait être possible de construire un détecteur à xénon liquide de dix tonnes, qui serait sensible aux neutralinos, même si leur probabilité d'interaction est très faible.

Il n'est pas indispensable que le xénon soit liquide. Certains détecteurs l'utilisent à l'état gazeux. Bien qu'un gaz ait une densité plus faible qu'un liquide, il révèle plus facilement les traces laissées par le recul du noyau. La trajectoire indique le point d'entrée de la particule, ce qui permet d'identifier la région du ciel d'où elle est venue et de vérifier si le responsable est un neutralino galactique. Des détecteurs de ce type sont en cours de développement dans les laboratoires souterrains de Boulby, en Grande-Bretagne.

L'emploi du xénon est commode parce que cet élément ne possède pas d'isotope radioactif naturel à longue durée de vie (ce qui réduit le bruit de fond) et qu'on le trouve facilement dans l'atmosphère terrestre (après purification, c'est-à-dire élimination du krypton radioactif introduit dans l'air par les essais nucléaires). Toutefois, ce n'est pas le seul matériau capable de scintiller au passage de particules. Le détecteur italien DAMA utilise un autre matériau, l'iodure de sodium. Avec une masse de 100 kilogrammes, DAMA est, aujourd'hui, le plus grand détecteur du monde.

Un peu de discernement

Le second grand défi est l'atténuation du bruit de fond dû à la radioactivité naturelle et aux rayons cosmiques. On prend en général trois mesures pour y répondre. Tout d'abord, les physiciens filtrent les rayons cosmiques en enterrant profondément leurs détecteurs sous plusieurs centaines de mètres de roche, et en les enfermant

dans des boucliers spéciaux. Le dernier-né des détecteurs du programme CDMS, qui a commencé à fonctionner à la fin 2002, est situé dans la mine de Soudan, dans le Minnesota. L'expérience *Edelweiss*, est installée depuis 1994 sous le mont Fréjus, en France. Quant au DAMA, ses instruments sont installés sous le Gran Sasso, dans le Parc national des monts de la Laga, près de Rome. La seconde mesure consiste à purifier le matériau du détecteur afin de réduire au maximum les signaux provoqués par la désintégration des noyaux radioactifs tapis au sein même du détecteur.

Toutefois, ces deux premières mesures ne suffisent pas à éliminer le bruit et la nouvelle génération de détecteurs utilise également des techniques de discrimination des événements afin de discerner les particules de matière noire des particules ordinaires. On peut, par exemple, mettre en évidence une variation annuelle du signal reçu. En effet, le flux de matière noire dans l'hémisphère Nord devrait être plus important l'été, lorsque le mouvement orbital de la Terre s'ajoute au mouvement du Système solaire à travers la galaxie, et moins important pendant l'hiver, quand le mouvement de la Terre va à l'encontre de celui du Système solaire (voir la figure 3). L'amplitude de cette oscillation annuelle du signal pourrait atteindre quelques pour cent.

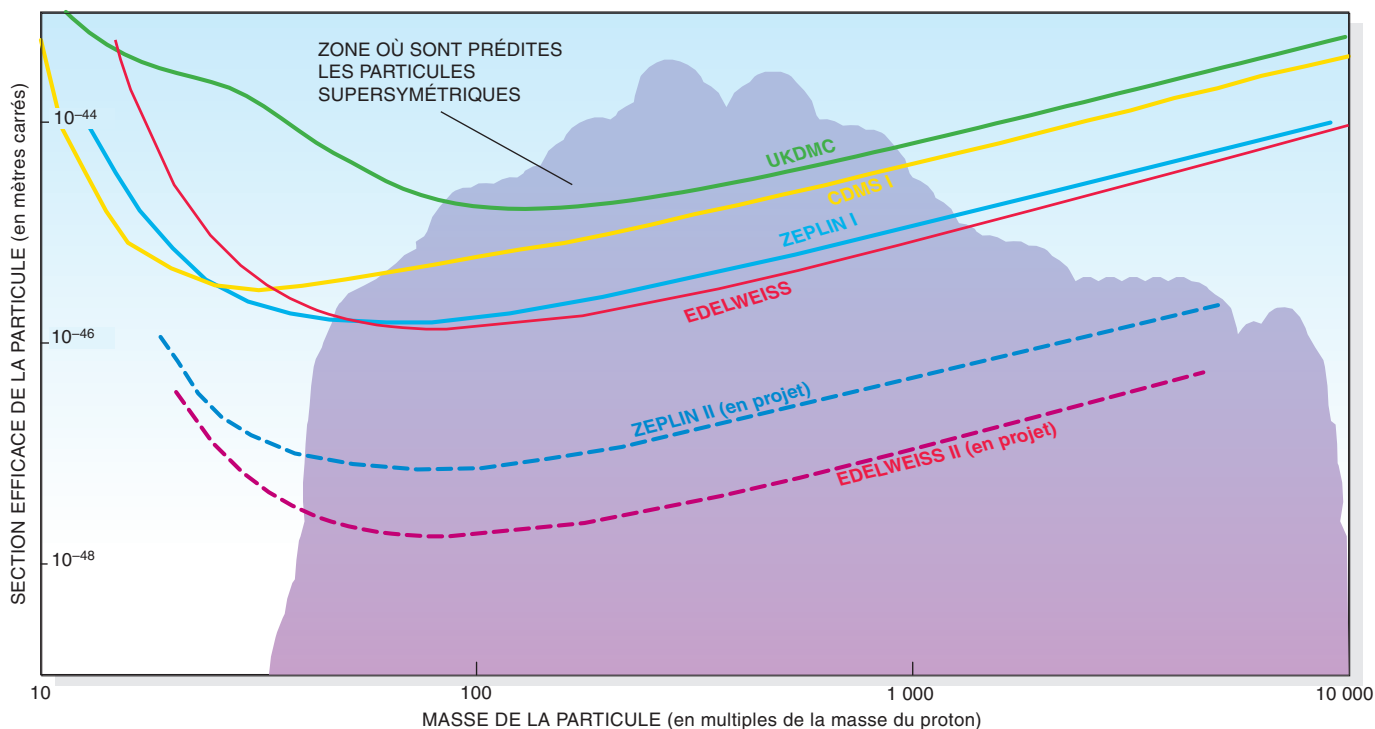
Par ailleurs, les projets les plus avancés ajoutent au détecteur principal une ligne de détection secondaire construite sur un principe différent et qui réagit de manière distincte à des types de particules distincts. Ainsi, par exemple, les particules ordinaires (qui constituent le bruit

L'état de l'art de la chasse à la matière noire

PROJET	LOCALISATION	DATE DE MISE EN ROUTE	DÉTECTEUR PRIMAIRE	MATÉRIAU CONSTITUANT LE DÉTECTEUR PRIMAIRE	MASSE (en kilogrammes)	MÉTHODE DE DISCRIMINATION
UKDMC	Boulby, Grande-Bretagne	1997	SCINTILLATION	IODURE DE SODIUM	5	AUCUNE
DAMA	Gran Sasso, Italie	1998	SCINTILLATION	IODURE DE SODIUM	100	AUCUNE
<i>Rosebud</i>	Rosebud	1998	CRYOGÉNIQUE	OXYDE DE BISMUTH ET DE GERMANIUM	0,02	THERMIQUE, SCINTILLATION
PICASSO	Sudbury, Canada	2000	GOUTTES LIQUIDES	FRÉON	0,001	AUCUNE
SIMPLE	Rustrel, France	2001	GOUTTES LIQUIDES	FRÉON	0,001	AUCUNE
DRIFT	Boulby, Grande-Bretagne	2001	IONISATION	XÉNON (GAZEUX)	0,003	TRAJECTOIRE
<i>Edelweiss</i>	Fréjus, France	1994	CRYOGÉNIQUE	GERMANIUM	1,3	IONISATION, THERMIQUE
ZEPLIN I	Boulby, Grande-Bretagne	2001	SCINTILLATION	XÉNON (LIQUIDE)	5	ÉVOLUTION TEMPORELLE
CDMS II	Soudan, Minnesota, USA	2003	CRYOGÉNIQUE	SILICE ET GERMANIUM	10	IONISATION, THERMIQUE
ZEPLIN II	Boulby, Grande-Bretagne	2003	SCINTILLATION	XÉNON (LIQUIDE)	30	IONISATION
CRESST II	Gran Sasso, Italie	2004	CRYOGÉNIQUE	OXYDE DE CALCIUM ET TUNGSTÈNE	10	SCINTILLATION
<i>Edelweiss II</i>	Fréjus, France	2004	CRYOGÉNIQUE	GERMANIUM	30	IONISATION, THERMIQUE

6. LES PROGRAMMES DE DÉTECTION en fonctionnement ou en projet (en gris, en bas) utilisent différentes techniques pour détecter l'énergie déposée dans la matière ordinaire lorsqu'une particule de matière noire percute un noyau atomique. Certains instruments enregistrent les impulsions lumineuses émises par les atomes excités lors du recul du noyau (scintillation). D'autres mesurent la très faible élévation de température qui s'ensuit (méthode thermique dans les détecteurs cryogéniques). Les systèmes à gouttes liquides sont maintenus en état de

surfusion et visent à observer le passage du liquide à l'état gazeux sous l'effet de la très faible perturbation induite par la matière noire. Les détecteurs modernes disposent également de méthodes de discrimination grâce auxquelles ils éliminent les événements provoqués par des rayons cosmiques ordinaires. Ils peuvent, par exemple, étudier l'évolution du signal au cours de l'année, la direction d'où proviennent les particules ou comparer leur signature thermique à l'ionisation ou à la scintillation qu'elles induisent dans la matière.



7. LA SENSIBILITÉ des détecteurs ne cesse de s'améliorer. Cette sensibilité varie avec la masse de la particule recherchée : la plupart des détecteurs ont une sensibilité maximale pour des particules ayant une masse comprise entre 50 et 100 fois celle du proton. Au-delà de cette masse, plus une particule est lourde, plus elle doit avoir une section efficace (la probabilité d'interaction avec un noyau du détecteur, par

exemple) élevée pour pouvoir être décelée. On a représenté les courbes de sensibilité de différents projets : ces projets CDMS, ZEPLIN et *Edelweiss* sont déjà susceptibles d'explorer une portion notable du domaine (en mauve) où les théoriciens prédisent l'existence de particules supersymétriques. Dans les années qui viennent, les différentes expériences devraient couvrir presque tout cet éventail.

de fond) produisent plus d'ionisation que les particules de matière noire : en effet, elles ionisent la matière du détecteur lors de leur passage, puis lorsqu'elles mettent en mouvement le noyau qu'elles percutent (alors qu'un neutralino n'ionise le détecteur qu'indirectement, en interagissant avec un noyau). Ainsi, *Edelweiss* combine cette mesure d'ionisation à la méthode cryogénique, ce qui, permet dès à présent d'éliminer 99,9 pour cent du bruit de fond et de distinguer un simple photon gamma d'une particule de matière noire.

Pour le moment, aucune particule de matière noire n'a été observée. Il y a deux ans, les chercheurs du DAMA ont signalé la possible détection d'une particule 60 fois plus massive que le proton, mais le CDMS n'a pu la découvrir et les premières mesures d'*Edelweiss* indiquent avec un très haut niveau de confiance que cette particule n'existe pas (du moins, si elle existait, elle n'entrerait pas dans le cadre de la supersymétrie, ce que l'on considère comme très improbable). Toutefois, nous ne devrions pas attendre très longtemps avant que les prochaines générations de détecteurs ne tranchent la question et ne concluent à la présence ou à l'absence de neutralinos dans notre environnement. En effet, de nouveaux détecteurs seront bientôt mis en service au CDMS, et *Edelweiss* devrait voir sa sensibilité multipliée par 100 dans les prochaines années. L'ensemble de ces instruments permettra de couvrir l'essentiel du domaine théorique à l'intérieur duquel les physiciens des particules prédisent l'existence du neutralino (voir la figure 7).

Et si les détecteurs ne trouvent rien ? Il faudra en conclure que la supersymétrie ne permet pas de régler le problème de la matière noire et que la nature a prévu autre chose. Les théoriciens devront envisager d'autres

voies, même si cela leur répugne. Au contraire, si nous trouvons le neutralino, cela serait l'une des plus grandes découvertes du XXI^e siècle. La découverte de ce qui constitue un tiers de la masse de l'Univers (c'est-à-dire presque tout, sauf l'énergie sombre) serait une révélation spectaculaire qui aurait de multiples conséquences. Si les détecteurs peuvent repérer les particules de matière noire, les accélérateurs de particules, tel le grand collisionneur hadronique du CERN (le LHC), pourraient peut-être créer ces particules, c'est-à-dire fabriquer de la matière noire dans des conditions expérimentales contrôlées ! La confirmation de la supersymétrie impliquerait, par ailleurs, l'existence d'un grand nombre de particules nouvelles attendant d'être dévoilées et conforterait la théorie des supercordes d'où les physiciens ont tiré l'idée de supersymétrie. Finalement, le plus grand des mystères de l'astronomie moderne n'en serait plus un.

David CLINE est professeur de physique à l'Université de Los Angeles, et travaille au détecteur CDMS du CERN de Genève.

GERARD JUNGMAN, MARC KAMIONKOWSKI et KIM GRIEST, *Supersymmetric Dark Matter*, in *Physics Reports*, vol. 267, n° TK, pp. 195 – 373, 1996.

DAVID CLINE, *Sources and Detection of Dark Matter and Dark Energy in the Universe*, Springer, 2001.

Y. RAMACHERS, *WIMP Direct Detection Overview*, Invited review at NEUTRINO 2002, Munich, Allemagne 25 au 25 mai 2002.

MARC LACHIEZE-REY, *La masse cachée de l'Univers*, in *Pour la Science*, n° 300, octobre 2002.

L'embolie des arbres

PIERRE CRUIZIAT • HERVÉ COCHARD • THIERRY AMÉGLIO

Les mécanismes de transport de l'eau dans les arbres en font des systèmes hydrauliques particulièrement bien adaptés à la sécheresse et au froid. Cependant, quand de l'air réussit à se glisser dans leurs « veines », la sève ne circule plus, et la survie de l'arbre est menacée.

En 1880, le botaniste allemand Edward Strasburger démontre en public que la montée de la sève est un processus essentiellement physique qui ne doit rien aux propriétés des cellules vivantes : pour les besoins de la démonstration, il coupe un chêne centenaire et l'immerge dans une solution de picrate qui tue les cellules. Pourtant, pendant des semaines, les feuilles restent vertes et le niveau de la solution diminue. Si elle orientait les recherches dans la bonne direction, cette expérience spectaculaire n'expliquait pas comment la sève parvient au faite des arbres parfois à plus de 100 mètres dans le cas des séquoias californiens, semblant « défier » les lois de la physique. Cette sève, dite « brute » ou xylémienne, est une solution très diluée, sauf pour certaines espèces vivant en milieu salé ou désertique. Une autre sève, dont il ne sera pas question ici, la sève élaborée, ou phloémienne, transporte, sous pression, dans des cellules vivantes, les sucres issus de la photosynthèse.

L'étude de l'« architecture hydraulique » des arbres – une expression due à Martin Zimmermann, alors directeur du Laboratoire d'études forestières de l'Université de Harvard – a tout récemment livré le secret du transport de la sève brute. La comparaison d'un arbre et de ses composants qui véhiculent l'eau des racines jusqu'aux feuilles avec un système hydraulique doté d'un générateur d'énergie, d'un système de contrôle, de réservoirs et de tuyaux a été féconde. Elle a permis d'élucider de nombreuses propriétés des végétaux vasculaires, notamment leurs capacités de résistance à la sécheresse et au froid. Cette étude a aussi précisé les connaissances que l'on a de la physiologie des arbres et d'un phénomène important pour leur croissance, voire pour leur survie : les embolies, dues aux bulles d'air qui se forment dans les éléments conducteurs de la sève et en perturbent la circulation. Aujourd'hui, on sait quantifier les caractéristiques hydrauliques de différentes essences et on peut les comparer. Enfin, ces études éclairent d'une façon nouvelle les relations entre le climat et la croissance des arbres.

Nous examinerons l'anatomie du système vasculaire d'un arbre et détaillerons les contraintes auxquelles il obéit pour assurer le transport de la sève. Puis, nous décrirons les mécanismes de l'embolie végétale, comment l'arbre y résiste et les conséquences de l'état hydrique sur sa croissance.

Pour les plantes vasculaires, et notamment pour les arbres, l'énergie nécessaire au transport de la sève brute

est fournie par le Soleil dont la chaleur vaporise l'eau liquide qui arrive dans les feuilles. La vapeur d'eau s'échappe par de petites ouvertures, nommées stomates, présentes à la surface des feuilles (voir la figure 2). Cette transpiration crée un gradient d'état de l'eau, on parle de potentiel hydrique entre les feuilles et le sol (ce potentiel est voisin du potentiel chimique créé par deux concentrations différentes d'un composé présent dans deux compartiments séparés par une membrane imperméable à ce composé). Durant la transpiration, le transport de l'eau à travers l'arbre est un processus passif constitué d'un flux en phase liquide – du sol vers les feuilles – et d'un flux en phase gazeuse – des feuilles vers l'atmosphère.

Dans les vaisseaux coule la sève

La transpiration foliaire dépend des conditions climatiques et de l'ouverture des stomates, qui jouent ainsi le rôle de régulateurs du système : par exemple, un fort ensoleillement, une faible humidité de l'air et un vent soutenu entraînent des transpirations notables quand les stomates sont ouverts. Un arbre isolé transpire quelques dizaines à quelques centaines de litres par jour. Les réservoirs du « système hydraulique » de l'arbre ont un rôle mineur vis-à-vis de la transpiration. Ils sont constitués par les cellules vivantes du végétal, qui se déshydratent ou se réhydratent en fonction des besoins.

Un arbre est un système de canalisations en série que parcourent des colonnes d'eau continues, des racines jusqu'aux feuilles. Par analogie, on compare le flux d'eau à travers un arbre à un courant électrique le long d'un circuit de résistances en série : dans chaque partie du circuit (le tronc, une branche...), le flux transpiratoire est quasiment égal à la différence de potentiel hydrique

1. LES ÉLÉMENTS CONDUCTEURS du bois acheminent la sève brute des racines aux feuilles. Ils sont de deux types, tous deux constitués de cellules mortes. Les conifères sont principalement dotés de trachéides (à gauche) : des cellules uniques, de quelques micromètres de diamètre et quelques millimètres de longueur, reliées par des perforations nommées ponctuations. Le bois des arbres feuillus (à droite) est composé de vaisseaux, c'est-à-dire d'empilements de plusieurs cellules vides dont les parois transversales ont disparu (sauf celles de l'extrémité des vaisseaux). Les vaisseaux mesurent entre 0,1 et 0,6 millimètre de diamètre et parfois plusieurs mètres de longueur.