

sophistiqué sous Goudéa, prince de Lagash, vers 2120. La toge, dont le tissu se termine par une frange faite des fils de chaîne, est restée à la mode à la cour babylonienne au début du II^e millénaire.

De nombreux textes administratifs consacrés aux textiles et vêtements ont été exhumés dans le palais de Mari, sur le moyen Euphrate. Publiés en 2009 par Jean-Marie Durand, professeur au Collège de France, ces documents nous apprennent par exemple que le roi de Mari s'habillait d'une chemise serrée à la taille par une écharpe ou une ceinture en cuir, par-dessus laquelle il enfilait une sorte de manteau couvert d'ornements divers.

Le roi adressa à ce sujet une lettre à l'un de ses hauts fonctionnaires : « Donne des ordres précis aux tailleurs et aux tisseuses. Il faut que cet habit, comme s'il était confectionné à Tuttoub, soit tissé et noué de façon soignée de chaîne et de trame et que son intérieur ressemble à une feuille d'argent. On ajoutera à cet habit des ourlets à la mode du Yamhad et on lui appliquera du tissu teint [en doré] pour qu'il ressemble à une étoffe brodée d'or. Il ne faudrait pas qu'après avoir installé ensemble chaîne et trame, les ornements soient [trop] lourds au moment où on les enfilera et que l'habit ne se déchire. Donne des ordres stricts et que l'on fasse très attention à cet habit. Il sera exposé aux yeux de toute la population. »

C'est à l'époque paléobabylonienne que l'on s'est mis à faire des vêtements coupés et assemblés, avec ajout de poches, impressions et broderies. Le roi portait un bonnet à larges bords, typique de la période paléobabylonienne. Au I^{er} millénaire, à la cour assyrienne ou dans les sanctuaires babyloniens, les rois et les dieux (statués) portaient des vêtements colorés et très élaborés, composés d'un habit du dessous, sorte de tunique à manches longues, d'un manteau brodé et décoré de métaux et pierres précieuses, ceint à la taille par une écharpe, et d'un turban sur la tête.

Sur les bas-reliefs du palais d'Assurnazirpal II (883-859), à Kalhou, le roi et les génies ailés portent ainsi des manteaux ornés de galons brodés, dont les motifs reproduisent ceux des reliefs : arbres sacrés, créatures fantastiques ou scènes de chasse.

Pour les civilisations du Proche-Orient ancien, comme pour nous aujourd'hui, les vêtements n'avaient pas qu'une simple fonction de protection ou de dissimulation du corps. On l'a vu dans l'épopée

de Gilgamesh, se vêtir était une marque de civilisation. Et comme l'attestent les sources, les vêtements avaient une forte valeur symbolique et sociale.

Le vêtement ou une partie de celui-ci, comme ses franges, servait de lien social, voire de double de la personne. Ainsi, au I^{er} millénaire, quand il ne pouvait honorer un rendez-vous, le roi d'Assyrie envoyait son manteau ; de même, en l'absence de leur souverain, les Babyloniens se prosternaient devant son habit. Les particuliers pouvaient signer un document en imprimant dans l'argile la frange de leur vêtement à la place du traditionnel sceau-cylindre. Lors d'une alliance, on nouait les franges des vêtements, et on les coupait en cas de rupture.

Le vêtement, acteur des échanges sociaux

Les vêtements participaient aux échanges à tous les niveaux de la société. Les travailleurs, y compris ceux du textile, recevaient des céréales, de l'huile et de la laine ou un vêtement en guise de rémunération. Les jeunes mariées apportaient dans leur dot des vêtements et des tissus d'ameublement. À Assour ou à Nouzi, au II^e millénaire, le vêtement symbolisait même toutes les possessions de l'individu. Ainsi, dans les divorces prononcés aux torts de la femme, cette dernière devait ôter la fibule retenant son vêtement et déposer celui-ci pour quitter « nue » la maison, abandonnant par là symboliquement toute possession à son époux. Les rois et les particuliers paraient leurs hôtes d'une tunique en signe d'accueil, et de luxueux habits étaient échangés dans les cours royales à titre de cadeaux diplomatiques.

Pour chaque étape importante de sa vie, le Mésopotamien revêtait une tenue de cérémonie particulière. Par exemple, à sa mort, son corps était parfois enveloppé dans des linges, tandis que ses proches déchiraient leurs vêtements en signe de deuil... pratique qui a toujours cours aujourd'hui.

En quelques millénaires, les civilisations du Proche-Orient ancien ont ainsi développé une production quasi industrielle de tissus en fibres végétales ou en laine, sont passées de simples vêtements drapés à des vêtements coupés et cousus, et ont chargé les habits de significations sociales – une évolution qui a conduit à une culture du vêtement pas si lointaine de la nôtre, mais sans doute moins consommatrice...

✓ BIBLIOGRAPHIE

C. Michel et M.-L. Nosch (éd.), *Textile Terminologies in the Ancient Near East and Mediterranean [...]*, Oxbow Books, 2010.

J.-M. Durand, *La nomenclature des habits et des textiles dans les textes de Mari*, CNRS Éditions, 2009.

M. Frangipane et al., *Arslantepe, Malatya (Turkey) : Textiles, tools and imprints of fabrics from the 4th to the 2nd millennium BCE*, *Paléorient*, vol. 35, pp. 5-29, 2009.

P. Bordreuil, F. Briquel-Chatonnet et C. Michel (éd.), *Les débuts de l'histoire*, La Martinière, 2008.

C. Breniquet, *Essai sur le tissage en Mésopotamie*, De Boccard, 2008.

C. Michel, *Femmes et production textile à Assur au début du II^e millénaire avant J.-C.*, *Techniques & culture*, vol. 46, pp. 281-297, 2006.

Les galaxies perdues

James Geach

**D'après les dernières estimations,
l'Univers observable contient 200 milliards de galaxies.
Pourquoi si peu ?**

J'ai toujours été intrigué et fasciné par l'abondance des galaxies, saupoudrées telles des grains de sable sur le ciel nocturne. L'image optique la plus sensible jamais réalisée par l'homme, le champ ultraprofond de *Hubble* ou HUDF (pour *Hubble Ultra Deep Field*), capture quelque 10 000 galaxies dans une zone équivalente à un centième de l'étendue de la pleine lune. Rapportée à l'ensemble de la voûte céleste, une telle densité implique un total de 200 milliards de galaxies environ. Et cela ne prend en compte que les plus lumineuses ; leur nombre véritable est sans doute beaucoup plus grand.

Comment toutes ces galaxies ont-elles vu le jour ? C'est cette question qui est à l'origine de ma vocation d'astronome et qui reste le point central de mon activité de recherche. À en juger par leur nombre, la nature semble très douée pour produire des galaxies. Ce n'est pourtant pas le cas. Si l'on additionne toute la matière visible contenue dans les galaxies actuelles, on n'obtient qu'un dixième de la matière totale

issue du Big Bang. Où est le reste, et pourquoi ne s'est-il pas retrouvé dans les galaxies ? Il s'agit là de deux des plus grandes énigmes de l'astronomie aujourd'hui.

Il ne faut pas confondre la matière manquante avec la matière noire et l'énergie sombre. Ces dernières sont des substances de nature inconnue qui, à elles deux, représentent 96 pour cent du contenu total de l'Univers. Quant au nombre de galaxies, le problème réside du côté des quatre pour cent que nous sommes censés bien connaître. Cette portion de l'Univers est composée de matière normale, celle-là même qui constitue notre corps et tout ce qui nous entoure : essentiellement des baryons, la classe de particules qui inclut les protons et les neutrons.

Le fait que la plus grande part de cette matière ordinaire nous échappe est un mystère dans le mystère. Car non seulement la plus grande part de la matière de l'Univers est invisible et inexpliquée, mais même pour la petite portion de matière ordinaire, seule une fraction est détectée.





1. EN PROIE AUX AFFRES DE LA NAISSANCE,
une galaxie semblable à la nôtre attire
du gaz froid dense (*écoulements rouges*),
mais rejette aussi du gaz brûlant
(*écoulements bleus*) dans le milieu intergalactique.
À la fin du processus, seule une petite fraction
de la matière initiale se retrouve dans
la galaxie. L'auteur et ses collègues ont
obtenu cette image à l'aide d'un programme
de simulation cosmologique.

L'ESSENTIEL

✓ Même si on laisse
de côté la matière noire,
la matière ordinaire
de l'Univers est déjà assez
mystérieuse. Pourquoi n'en
retrouve-t-on qu'une petite
fraction dans les galaxies ?

✓ Selon l'hypothèse
généralement admise
aujourd'hui, le gros de
la matière ordinaire serait
piégé dans des filaments
gazeux géants. Ce milieu
intergalactique « chaud
à très chaud », ou WHIM,
est difficile à détecter
directement.

✓ De plus, la formation
de galaxies est assez
inefficace. À mesure que
de la matière tombe sur
une galaxie, celle-ci en
rejette une bonne partie,
selon un ensemble de
mécanismes nommé
rétroaction galactique.

James E. Gaeth et Rob Crain

L'AUTEUR



James GEACH, né en Angleterre, est astronome observateur. Il est actuellement chercheur postdoctoral à l'Université McGill de Montréal, au Canada.

Une autre façon de présenter les choses est de dire que le processus de formation des galaxies est inefficace – un peu comme si un fermier semait tout un champ et que seule une graine sur dix levait. Les astronomes essaient depuis des années d'expliquer pourquoi. La réponse qui émerge nous oblige à revoir l'idée que nous nous faisons de la formation des galaxies, et, plus radicalement encore, à revoir la nature même de ce qu'est une galaxie.

Depuis des décennies, les observateurs reconstituent une chronologie de l'histoire cosmique décrivant le contenu de l'Univers à différentes étapes de son évolution. Ce faisant, il est progressivement apparu qu'il y avait plus de baryons à l'aube de l'Univers que nous n'en détectons directement aujourd'hui.

On a perdu la moitié de l'Univers !

La quantité initiale de matière baryonique est en fait assez simple à estimer. Cette information est contenue dans le rayonnement fossile du Big Bang, le fond diffus cosmologique. Des expériences de pointe, comme WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) ou l'observatoire spatial *Planck*, ont détecté de petites fluctuations de température de ce rayonnement. La distribution de ces fluctuations reflète la densité en baryons de l'Univers à une époque où les galaxies n'étaient pas encore formées.

La mesure des abondances en hélium, deutérium et lithium apporte une vérification indépendante. Ces éléments ont été synthétisés dans les premières minutes de l'Univers en proportions qui dépendaient de la quantité totale de matière baryonique. Les deux techniques indiquent que la masse totale de matière baryonique devrait représenter quatre pour cent du contenu total de l'Univers actuel (17 pour cent de la masse totale).

Initialement, tous les baryons étaient sous forme d'un gaz chaud qui remplissait l'espace. Dans les régions où la densité de matière initiale était élevée, le gaz s'est accumulé sous l'effet de la gravité en nuages de plus en plus denses, qui ont été le point de départ de la formation des galaxies. Les astronomes ont détecté ce réservoir de gaz dans l'Univers jeune en analysant la lumière provenant de lointains quasars brillants. Peu importe pour nous à ce stade la nature des quasars ; il suffit de les considérer comme des pha-

res extrêmement brillants, qui éclairent par derrière le gaz primordial flottant dans l'espace intergalactique. Quand un rayon lumineux issu d'un quasar traverse un nuage d'hydrogène neutre et froid, le gaz absorbe une partie des photons. Le nuage n'absorbe que les photons ayant une certaine énergie, et cela se traduit par une lacune dans le spectre du quasar à une longueur d'onde bien précise : c'est ce que les astronomes appellent une raie d'absorption.

Un rayon lumineux provenant du quasar peut traverser une centaine de nuages de ce genre lors de son trajet à travers l'Univers, et chacun peut imprimer une raie d'absorption à une longueur d'onde légèrement différente, qui dépend de la distance entre le nuage et l'observateur. En faisant la somme de ces raies d'absorption, on peut calculer quelle proportion de baryons était contenue dans ces nuages. Le résultat suggère que jusqu'à cinq milliards d'années après le Big Bang, soit il y a environ neuf milliards d'années, on pouvait retrouver la trace du stock initial de l'Univers en baryons. La plus grande part de la matière baryonique flottait dans l'espace intergalactique et ne s'était pas encore effondrée pour former des galaxies lumineuses.

Au cours des neuf milliards d'années écoulées depuis, la plupart des galaxies que nous voyons aujourd'hui se sont formées à partir de ce vaste réservoir d'hydrogène primordial. À l'intérieur des galaxies, les baryons ont pris diverses formes : étoiles, vestiges stellaires, gaz neutre (atomique ou moléculaire), gaz ionisé, poussière, planètes, êtres vivants.

On peut estimer la masse des baryons des différentes formes en mesurant leurs émissions sur l'ensemble du spectre électromagnétique. Par exemple, la lumière visible et dans l'infrarouge proche révèle la masse des étoiles ; une raie d'émission radio particulière signale la quantité d'hydrogène atomique neutre ; la lumière infrarouge trahit la présence de poussière interstellaire.

Les astronomes ont recensé ainsi toutes les différentes phases de baryons dans toutes les galaxies observables, et c'est là qu'apparaît le désaccord : le total rend compte de seulement dix pour cent du stock initial de baryons présent dans l'Univers jeune. Difficile de croire qu'ils ont purement et simplement disparu : ils doivent traîner dans les vastes espaces intergalactiques. Mais pourquoi ne les voyons-nous pas ?

✓ BIBLIOGRAPHIE

R. Davé *et al.*, *The intergalactic medium over the last 10 billion years - 1. Ly-alpha absorption and physical conditions*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 408, n° 4, pp. 2051-2070, novembre 2010.

J. E. Geach *et al.*, *The Chandra deep protocluster survey: Ly-alpha blobs are powered by heating, not cooling*, *Astrophysical Journal*, vol. 700, n° 1, pp. 1-9, juillet 2009. arxiv.org/abs/0904.0452

Galaxies : fenêtres sur l'Univers, *Dossier Pour la Science*, n° 56, juillet-septembre 2007.

W. Tucker *et al.*, *Le souffle des trous noirs*, *Pour la Science*, n° 354, avril 2007.

E. Scannapieco *et al.*, *Le milieu intergalactique*, *Pour la Science*, n° 301, novembre 2002.

Site de l'auteur : www.physics.mcgill.ca/~jimgeach

Les astronomes savent où trouver certains de ces baryons intergalactiques. Les amas, des essaims denses de galaxies, sont remplis de gaz ionisé diffus, ou plasma. Le champ gravitationnel intense de l'amas imprime aux ions une grande vitesse, conférant au plasma une température de plusieurs centaines de millions de degrés, suffisamment pour qu'il émette des rayons X. Des télescopes spatiaux tels que XMM-Newton et *Chandra* détectent de façon routinière des amas de galaxies au moyen de cette émission de rayons X.

Mais les amas sont rares, si bien que le gaz qu'ils contiennent ne rend compte que de quatre autres pour cent des baryons. Quand on additionne tous les baryons que nous voyons dans les galaxies, les amas et ailleurs dans l'espace intergalactique, cela ne représente toujours qu'une moitié du total environ, ce qui veut dire qu'il reste l'équivalent de 500 milliards de galaxies à trouver.

Pour équilibrer les comptes, Renyue Cen et Jeremiah Ostriker, de l'Université de Princeton, Romeel Davé de l'Université de l'Arizona, et leurs collaborateurs ont émis il y a une dizaine d'années l'hypothèse que les baryons sont présents, mais qu'ils ont évolué en une phase difficile à détecter. Les propriétés de ce composant insaisissable sont liées à la façon dont la matière cosmique de tous types, ordinaire comme exotique, s'organise en structures à grande échelle.

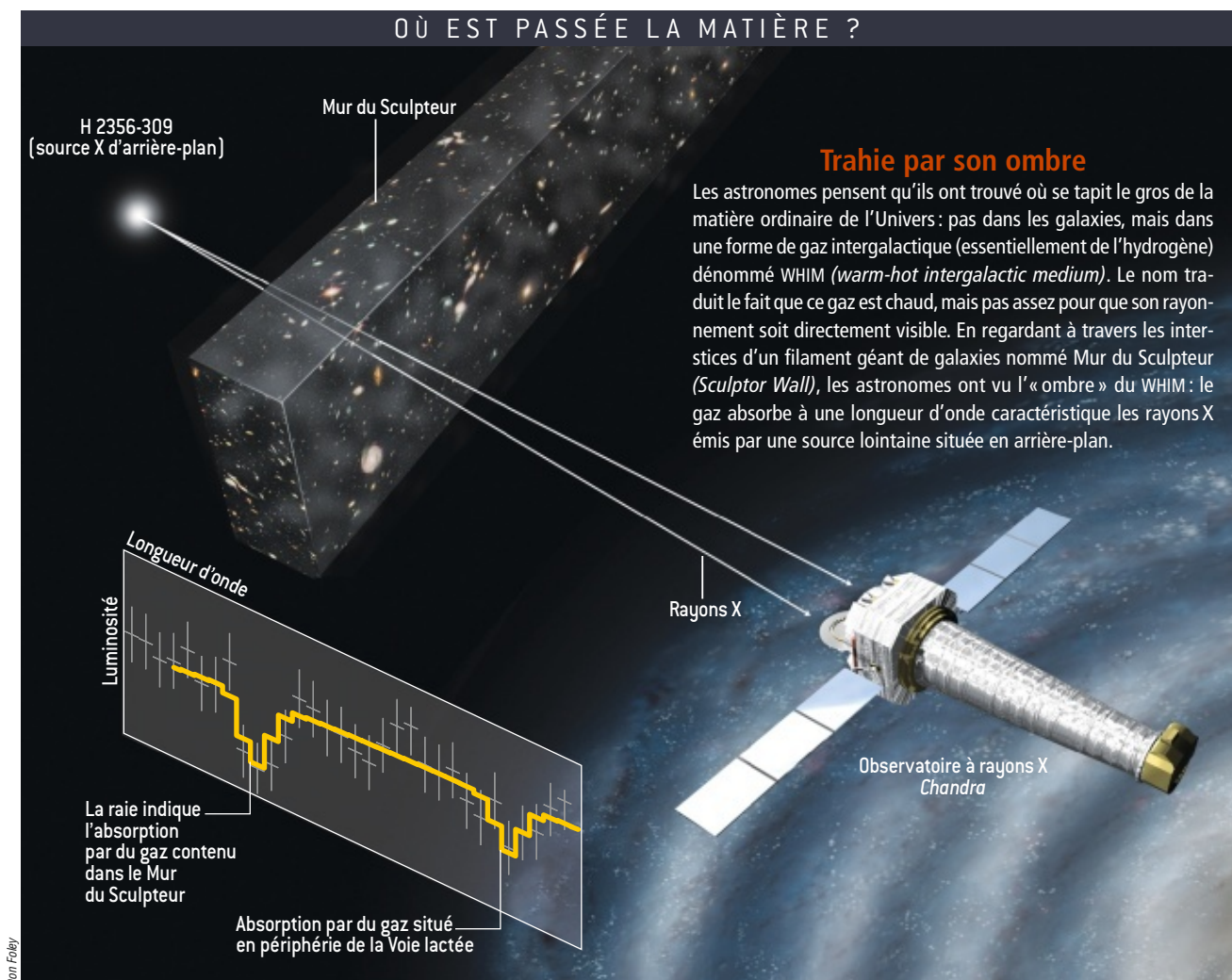
Les caprices du WHIM

Sous l'influence de la gravité, la matière noire s'est agencée en un vaste réseau de filaments qui s'enchevêtrent dans l'Univers. Les amas sont en fait les nœuds de grande densité de cette toile cosmique. En dehors des amas, la plupart des galaxies se rassemblent en groupes de plus faible densité ou s'alignent le long de filaments.

Le gaz intergalactique est attiré par la gravité vers les filaments, et les simulations suggèrent qu'en tombant, il est chauffé par des ondes de choc à des températures allant de 100 000 degrés à des dizaines de millions de degrés. Cela peut paraître brûlant, mais c'est tiède par rapport au gaz des amas. C'est suffisamment chaud pour qu'il reste ionisé, mais trop froid pour qu'il émette des rayons X.

R. Cen, J. Ostriker et R. Davé ont surnommé ce matériau WHIM (pour *warm-hot intergalactic medium*, ou milieu intergalactique chaud à très chaud – et *whim* signifie caprice). Si l'on arrivait à confirmer sa présence et son étendue, on parviendrait peut-être à mettre le doigt sur l'emplacement et l'état des baryons manquants.

La façon la plus prometteuse de détecter le WHIM est de rechercher des constituants à l'état de traces tels que l'oxygène ou l'azote ionisés, qui absorbent la lumière ultraviolette ou les rayons X à



des longueurs d'onde particulières. En fait, les astronomes peuvent appliquer la même technique des raies d'absorption que celle utilisée pour le recensement des nuages d'hydrogène froid dans l'Univers jeune; en d'autres termes, on peut rechercher les raies d'absorption dans le spectre des quasars qui rétroéclairent le WHIM.

Nous avons déjà pu en entrapercevoir de très prometteuses. Dans l'ultraviolet, le télescope spatial *Hubble* et l'instrument FUSE (*Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer*, dont la mission est achevée) ont détecté une absorption par de l'oxygène fortement ionisé. Les premiers indices nous sont parvenus il y a un peu plus de dix ans, alors que le concept de WHIM était tout nouveau. Todd Tripp, maintenant à l'Université du Massachusetts à Amherst, et Blair Savage, de l'Université du Wisconsin à Madison, ont détecté une absorption par de l'oxygène ionisé dans le spectre du quasar PG 0953+415, dans l'ultraviolet lointain.

D'avantage d'observations ont suivi dans la dernière décennie, rendues possibles par les améliorations des instruments, la plus récente étant l'installation du *Cosmic Origins Spectrograph* sur *Hubble*. Bien que les systèmes contenant de l'oxygène fortement ionisé semblent très répandus, cet ion ne signe que la partie relativement froide du WHIM. Pour traquer le gaz chaud, plus abondant, il faut rechercher une absorption par des espèces encore plus fortement ionisées.

Taotao Fang, de l'Université de Californie à Irvine, et ses collaborateurs ont utilisé les télescopes à rayons X *Chandra* et *XMM-Newton* pour jeter un coup d'œil dans les interstices du Mur du Sculpteur (*Sculptor Wall*, en anglais), une vaste chaîne de galaxies située dans l'Univers local: un parfait terrain de chasse au WHIM. Ils ont trouvé une absorption par de l'oxygène ionisé au point d'avoir perdu presque tous ses électrons. L'équipe a estimé que la densité globale des baryons dans cette composante du WHIM est en accord avec les simulations cosmologiques.

Bien qu'encourageantes, ces observations ne font que gratter la surface. Les

observations sont difficiles: le signal WHIM est faible, et nous travaillons en général aux limites techniques des instruments. Même quand nous détectons une absorption, nous devons faire de nombreuses hypothèses sur la composition du gaz pour appréhender les propriétés plus générales du WHIM. Plus important, la technique des raies d'absorption repose sur des quasars dont la présence à tel ou tel endroit est fortuite. Les quasars sont rares, les quasars brillants encore plus, ce qui fait de la chasse au WHIM une sorte de loterie. Néan-

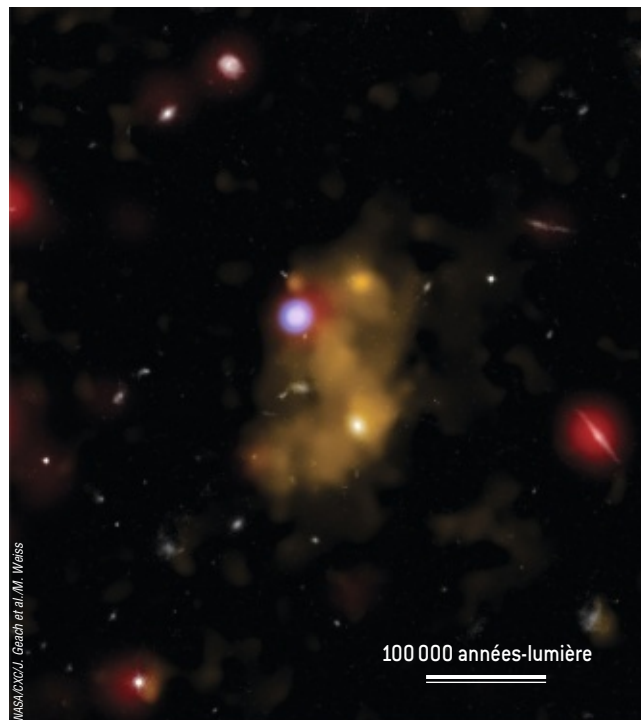
Un autre point est clair: la formation de galaxies était autrefois beaucoup plus efficace. Il y a environ huit milliards d'années, le taux de naissance des étoiles était 10 à 20 fois plus élevé qu'aujourd'hui. La plupart des galaxies que nous voyons aujourd'hui se sont formées à cette époque. Afin d'expliquer pourquoi la formation de galaxies s'est à tel point ralentie, les astronomes ont dû repenser nos modèles fondamentaux de la naissance des galaxies.

En principe, la recette pour faire une galaxie est très simple. Selon un modèle introduit dans les années 1990 par Simon White, de l'Institut Max Planck d'astrophysique de Garching, en Allemagne, et Carlos Frenk, de l'Université de Durham en Angleterre, les galaxies croissent au sein de grumeaux massifs de matière noire, nommés halos, dont l'attraction gravitationnelle aspire le gaz environnant comme de l'eau s'engouffrant dans une bonde.

Dans ce modèle, une partie du gaz est chauffée par des ondes de choc en traversant le halo, puis se refroidit par rayonnement, ce qui lui permet de s'agglomérer en un corps cohésif. Une fois dans la galaxie, le gaz peut continuer à se refroidir et s'effondrer en nuages d'hydrogène moléculaire. Sous l'effet de la contraction gravitationnelle, ces nuages finissent éventuellement par atteindre la densité

nécessaire pour former des étoiles. Des galaxies plus grosses peuvent se former par fusion de petites galaxies.

S. White et C. Frenk étaient bien conscients que leur modèle n'était pas complet. Par exemple, tout le gaz qui pénètre dans les galaxies n'était pas chauffé par les ondes de choc jusqu'à atteindre de hautes températures. Mais le scénario de l'accrétion de gaz au sein des halos de matière noire donnait aux astronomes un cadre solide pour comprendre les principes de formation des galaxies. Ce domaine a été florissant ces 20 dernières années. Les théoriciens ont exploré plus avant la physique des écoulements de gaz et affiné le modèle initial. Des simulations numériques récentes, à haute résolution, de l'évolution thermodynamique du gaz suggèrent



2. CETTE MASSE INFORME d'hydrogène gazeux (en jaune) semble être le rebut de la formation d'une galaxie massive.

moins, nous pensons savoir où se trouvent les baryons manquants, et comment les détecter. De nombreux astronomes travaillent actuellement à cartographier sérieusement le WHIM.

Bataille pour des baryons

L'existence du WHIM explique en partie pourquoi la formation des galaxies est si inefficace. L'apparition d'une structure à grande échelle a rendu le gaz intergalactique trop ténu et chaud pour s'accumuler et constituer les réservoirs froids et denses nécessaires à la formation de galaxies. Mais à l'évidence, certains baryons ont réussi à former des galaxies, sinon nous ne serions pas là.

qu'une partie du gaz entrant dans les disques galactiques en formation du jeune Univers s'écoule en flots relativement froids (10 000 à 100 000 degrés) et étroits (quelques milliers d'années-lumière de largeur). Ces flots froids semblent pénétrer le gaz chaud du halo et alimenter directement les galaxies.

Personne n'a encore vu ce processus à l'œuvre : la physique détaillée de l'accrétion de gaz vers les galaxies est complexe, et les différentes simulations prédisent des choses légèrement différentes. À ces réserves près, les astronomes admettent maintenant que toutes les galaxies se forment par accumulation de gaz primordial, que ce soit du gaz qui chauffe et se refroidit ou du gaz qui ne chauffe jamais.

Le problème avec ce modèle est que l'écoulement de gaz dans les galaxies ne peut pas se poursuivre avec la même vigueur. Les galaxies croîtraient jusqu'à devenir monstrueuses, et nous savons que cela n'arrive pas : les galaxies actuelles n'occupent qu'une gamme limitée de masses. Les premiers modèles semblaient reproduire assez fidèlement l'éventail observé des masses galactiques. Toutefois, avec le recul, on s'aperçoit qu'ils ne marchaient que parce que les astronomes utilisaient, pour la densité globale des baryons, une valeur sous-estimée d'un facteur deux par rapport à la valeur actuelle. Quand les nouvelles mesures ont révisé à la hausse la fraction des baryons, les théoriciens se sont aperçus que leurs modèles d'Univers prédisaient beaucoup plus de galaxies massives que l'on n'en observe.

Un autre problème est que les modèles prédisent une profusion de petits grumeaux de matière noire qui s'agglomèrent en corps de plus en plus gros. Les galaxies ne suivent pas cette tendance. Les astronomes ne voient pas autant de petites galaxies que les modèles n'en prédisent, et les galaxies les plus massives semblent s'être formées rapidement et efficacement, plutôt que par un assemblage progressif de petits morceaux.

Il manquait clairement aux modèles un ingrédient essentiel. Quelque chose doit réguler le refroidissement du gaz et la formation des étoiles dans les galaxies. Ce processus a rendu les petites galaxies peu efficaces pour former des étoiles, et a limité la taille des galaxies massives. Les théoriciens ont commencé à envisager toute une variété de processus physi-

ques supplémentaires susceptibles d'apporter cette régulation.

Désignés collectivement sous le nom de rétroaction galactique, ces processus peuvent contrer ou inverser l'effondrement gravitationnel du gaz sur les galaxies et ainsi limiter le nombre d'étoiles pouvant se former. Ils incluent les explosions de supernovae, le rayonnement ultraviolet et les éjecta d'étoiles, et l'extraordinaire énergie libérée pendant la croissance des trous noirs supermassifs tapis au cœur de toutes les galaxies massives. Dans les galaxies les plus massives, les trous noirs sont probablement le mécanisme de rétroaction dominant ; dans les systèmes de moindre masse, les supernovae et les vents stellaires sont plus importants.

Ce que tous ces processus ont en commun est de réinjecter de l'énergie dans le milieu environnant. Les galaxies peuvent ainsi étouffer le flot entrant de matière, empêcher le gaz qui s'est déjà accumulé de former des étoiles ou, dans les cas extrêmes, rééjecter des baryons dans l'espace intergalactique.

Recyclage de baryons

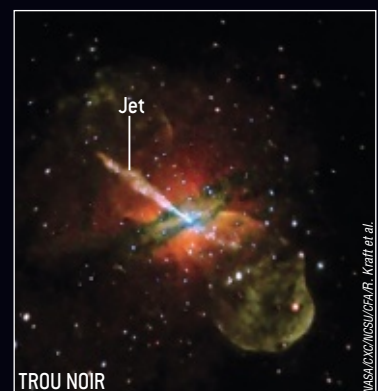
Les simulations qui prennent en compte les processus de rétroaction galactique reproduisent bien mieux la diversité observée des galaxies. Non seulement la rétroaction joue un rôle crucial pour expliquer l'évolution des galaxies, mais c'est un ensemble de processus qui peut aussi réalimenter, réchauffer et enrichir le WHIM. Par un processus continu de refroidissement et de chauffage, les baryons connaissent tout un cycle entre l'espace intergalactique, les étoiles et le gaz des galaxies. La croissance des galaxies est déterminée par un équilibre fragile qui a penché tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre tout au long de l'histoire cosmique. Avec la compréhension de cette bataille des baryons, nous voyons la formation des galaxies sous un jour nouveau.

L'étude du refroidissement du gaz et de la rétroaction galactique a été l'un des principaux centres d'intérêt des astrophysiciens durant la dernière décennie. Sans données empiriques, nous n'avons aucun moyen de tester les modèles. Un écoulement de matière froide entrant dans une galaxie se tahirait par la lueur diffuse émise par l'hydrogène qui se refroidit. La rétroaction se signifierait par l'émission infrarouge brillante émanant d'une intense

EXPULSION GALACTIQUE

Avalée et recrachée

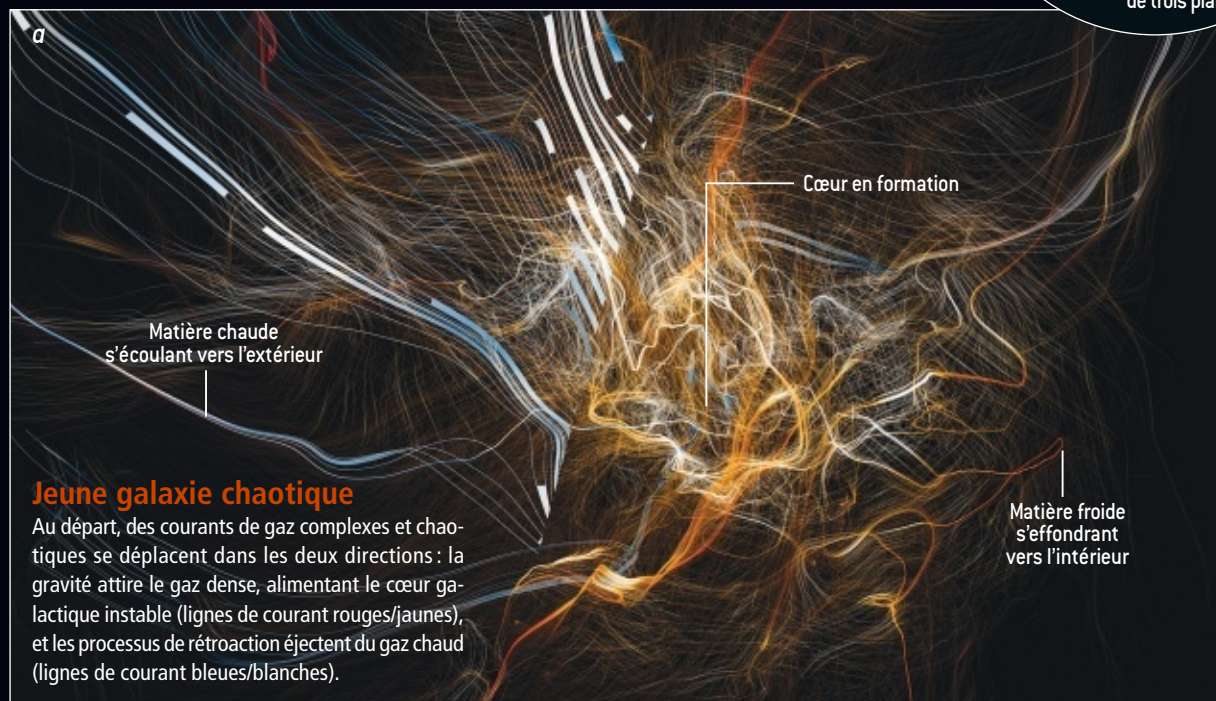
Pourquoi ne trouve-t-on dans les galaxies qu'une faible fraction de la matière cosmique ? Non seulement l'essentiel de la matière aboutit dans le WHIM, mais les galaxies limitent aussi leur propre croissance. Le gaz intergalactique aspiré par leur gravité se condense en étoiles et en trous noirs. Ces objets réalimentent le milieu interstellaire et intergalactique, ce qui s'oppose à l'effondrement. Les processus de rétroaction incluent les vents soufflés par les étoiles, les explosions stellaires telles les supernovae et les jets expulsés par les trous noirs.



La valse turbulente

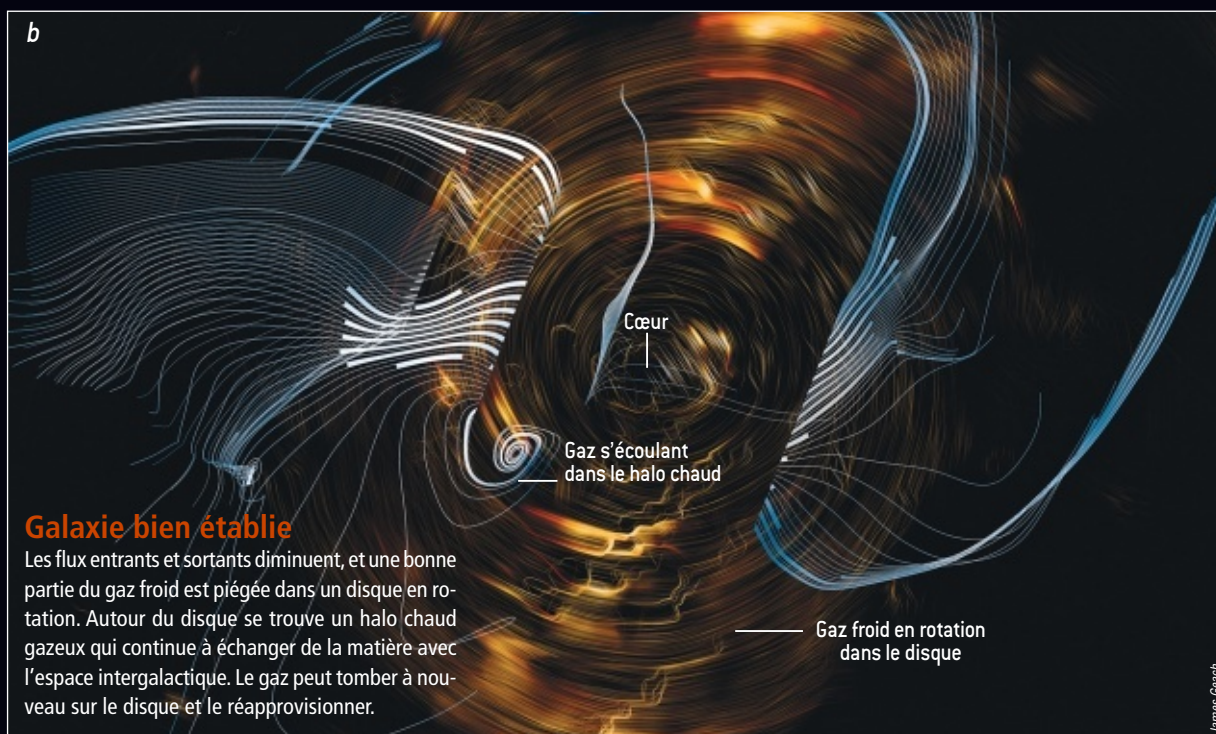
La plupart des gens se représentent les galaxies comme des structures imposantes : des boules géantes ou de majestueux tourbillons d'étoiles flottant dans le vide de l'espace profond. Mais les astronomes découvrent que les galaxies sont des systèmes fluides qui échangent activement de la matière avec leur envi-

ronnement. La matière ordinaire entre et sort des galaxies de façon cyclique, et à tout moment, c'est l'espace intergalactique qui en contient le plus. Cette simulation montre une galaxie semblable à notre Voie lactée telle qu'elle serait apparue il y a dix milliards d'années (a), et aujourd'hui (b).



Jeune galaxie chaotique

Au départ, des courants de gaz complexes et chaotiques se déplacent dans les deux directions : la gravité attire le gaz dense, alimentant le cœur galactique instable (lignes de courant rouges/jaunes), et les processus de rétroaction éjectent du gaz chaud (lignes de courant bleues/blanches).



Galaxie bien établie

Les flux entrants et sortants diminuent, et une bonne partie du gaz froid est piégée dans un disque en rotation. Autour du disque se trouve un halo chaud gazeux qui continue à échanger de la matière avec l'espace intergalactique. Le gaz peut tomber à nouveau sur le disque et le réapprovisionner.

James Graich

formation d'étoiles et par l'émission X ou radio issue des environs d'un trou noir supermassif. Nous devons prendre ces deux processus en flagrant délit. Et c'est peut-être cela que nous avons fait récemment.

Il y a une dizaine d'années, Charles Steidel, de l'Institut de technologie de Californie, et ses collaborateurs ont découvert une nouvelle classe d'objets qui semble être une signature observationnelle du refroidissement : les nuages Lyman-alpha. Lyman- α désigne l'une des raies d'émission lumineuse de l'hydrogène.

Grosses masses nuageuses

Ces objets semblent être des masses nuageuses et lumineuses pouvant atteindre 300 000 années-lumière de diamètre, beaucoup plus que notre galaxie, la Voie lactée, ce qui les place parmi les plus gros objets lumineux de l'Univers jeune. Les astronomes en ont, depuis, découvert des quantités. Le rayonnement Lyman- α observé ressemble étonnamment à la signature radiative prédite théoriquement pour un écoulement de gaz froid en direction de jeunes galaxies.

Cependant, de nombreux autres processus astrophysiques pourraient être responsables de l'émission Lyman- α . Par exemple, la lumière ultraviolette ou le vent galactique pourraient « pomper de l'énergie » dans les nuages et les faire briller. À l'aide de *Chandra*, mes collègues et moi avons montré que de nombreux nuages Lyman- α contiennent des galaxies pourvues de trous noirs en phase de croissance active qui brillent fortement dans le domaine X. Cette activité s'accompagne souvent d'une intense formation d'étoiles, mise en évidence par l'émission infrarouge au milieu des couches de poussière qui obscurcissent les pouponnières stellaires. Nous avons calculé que l'énergie libérée par ces processus est plus que suffisante pour alimenter l'émission Lyman- α . Il se peut donc que la lueur des nuages résulte non pas d'un refroidissement, comme beaucoup le pensent, mais d'un chauffage.

Plutôt que de clarifier la situation, les nuages Lyman- α ont donc encore davantage brouillé les pistes. Nous devons maintenant concevoir et effectuer de nouvelles observations pour essayer de dévoiler ce qui se passe vraiment. Dans un cas comme dans l'autre, les nuages Lyman- α sont un

type d'objets susceptible de combler certaines lacunes dans notre compréhension de l'origine des galaxies.

L'observation que le milieu intergalactique entourant les galaxies jeunes et actives est inondé de rayonnement pourrait contribuer à résoudre un autre problème des modèles de formation des galaxies. D'après des simulations à très haute résolution de la matière noire, les galaxies telles que la Voie lactée devraient être accompagnées de milliers de galaxies naines tournant autour d'elles comme des abeilles autour d'une ruche. La Voie lactée a certes quelques compagnons nains, mais bien moins nombreux que ne le prédisent les simulations.

Une solution possible à ce problème est que les galaxies naines se sont effectivement formées dans l'Univers jeune, mais que leurs galaxies-parents les ont soufflées par leur rayonnement et leurs vents. Ce tir de barrage a dépouillé de baryons les galaxies naines ayant réussi à en accumuler, ce qui n'a laissé que des masses de matière noire dénudées, errant depuis à la périphérie des galaxies-parents.

Classiquement, nous nous représentons les galaxies lumineuses comme des univers-îles isolés et discrets, pour reprendre les termes du philosophe allemand Emmanuel Kant. D'une certaine manière, c'est vrai. Mais les îles galactiques lumineuses sont juste la partie visible d'un océan beaucoup plus vaste de matière baryonique qui nous échappe encore. Ce matériau imprègne tout l'Univers, distribué et mis en forme par une vaste architecture sous-jacente de matière noire, en constante évolution sous l'effet de la gravité.

Une nouvelle vision des galaxies

Tous ces baryons ont connu le même état initial : un milieu brûlant tout neuf qui a rapidement formé les premiers éléments, hydrogène et hélium, ainsi que de petites quantités de deutérium et de lithium. Ce que nous appelons des galaxies s'est formé à partir de cette matière première, concentrée par la gravité. Mais ces structures baryoniques ne sont pas figées. La matière se déplace le long de ces structures dans le cadre d'un vaste cycle en place depuis le Big Bang. Les influences concurrentes de la gravité et de la rétroaction galactique entraînent le refroidissement du gaz tombant sur les galaxies, puis son éjection hors des galaxies.

De récentes simulations numériques, réalisées par Rob Crain, de l'Université Swinburne de technologie de Melbourne, en Australie, Benjamin Oppenheimer, de l'Université de Leyde aux Pays-Bas, et leurs collaborateurs, suggèrent que jusqu'à la moitié des baryons aujourd'hui contenus dans les galaxies de l'Univers local sont passés au moins une fois dans le milieu intergalactique, et souvent de nombreuses fois. Les baryons dont notre corps est composé prennent part à ce cycle depuis 14 milliards d'années ; de la matière de notre ongle, par exemple, a pu être formée au sein d'étoiles d'autres galaxies, puis s'exiler durant des milliards d'années dans l'espace intergalactique avant de trouver asile dans notre Système solaire. Nous ne sommes qu'une phase éphémère, l'hôte d'un instant de cette rare substance que nous qualifions d'ordinaire.

Cette idée de cycle baryonique est à la base d'une nouvelle vision de l'évolution des galaxies, où celles-ci ne sont qu'une petite composante de l'évolution à grande échelle du milieu intergalactique. L'Univers baryonique est essentiellement gazeux, et non galactique. Le milieu intergalactique est le champ de bataille de diverses forces, et au milieu de ce maels-tröm se forment des galaxies. Les galaxies ne constituent qu'une étape de traitement au cours d'un cycle qui fait constamment passer les baryons d'une phase à l'autre, et à tout instant, la plupart des baryons se trouvent en dehors des galaxies.

Nous avons, peut-être sentimentalement, une considération particulière pour les galaxies : la Voie lactée est notre habitat cosmique, une vaste demeure brillante et complexe plongée dans l'obscurité du cosmos. D'un point de vue anthropique, nous avons la chance d'exister à un moment où les baryons qui constituent la Terre sont sous une forme froide et stable. Cela ne sera pas toujours le cas. La mort du Soleil, dans cinq milliards d'années environ, fera brûler les planètes internes, s'évaporer les planètes externes, et redispersera progressivement les éléments lourds résultants dans le milieu interstellaire. À moins que l'humanité ne réussisse à se sortir de ce cycle en développant la capacité technique de s'échapper du Système solaire, les cendres de tout ce qui a jamais existé sur Terre sont vouées à être restituées, enrichies, au cosmos. Et c'est ainsi que le cycle se poursuivra. ■

Des hallucinogènes médicaments

Roland Griffiths et Charles Grob

Les hallucinogènes, telle la psilocybine extraite de champignons, modifient l'humeur. Ils sont à nouveau étudiés chez l'homme, car ils pourraient diminuer l'anxiété ou soulager la douleur.

Au printemps 2004, Sandy Lundahl, 50 ans, s'est présentée au Centre de recherche de biologie comportementale de la Faculté de médecine à l'Université Johns Hopkins, aux États-Unis. Elle était volontaire pour une série d'expériences sur les hallucinogènes, la première autorisée aux États-Unis depuis plus de 30 ans. Elle a rempli des questionnaires, discuté avec les deux expérimentateurs qui allaient rester près d'elle pendant les huit heures que devait durer l'expérience et s'est installée dans l'espace aménagé à cette fin. Elle a alors avalé deux comprimés et s'est allongée sur le divan, avec un masque sur les yeux et des écouteurs diffusant de la musique classique sélectionnée pour qu'elle se détende.

Les capsules contenaient une quantité importante de psilocybine, la principale substance active des champignons hallucinogènes (voir la figure 3). À l'instar du LSD et de la mescaline, la psilocybine produit des changements de l'humeur et de la perception, mais rarement de vraies hallucinations. À la fin de l'expérience, lorsque

L'ESSENTIEL

✓ Des centaines d'études sur les hallucinogènes ont été publiées dans les années 1950 et 1960. Ces molécules pourraient soulager des patients souffrant de divers troubles psychiatriques.

✓ Les expériences chez l'homme ont dû s'arrêter à cause de restrictions sur la recherche, imposées suite à l'usage illicite de ces drogues.

✓ Aujourd'hui, on teste si les hallucinogènes, notamment la psilocybine, peuvent soulager l'anxiété des patients cancéreux ou aider les personnes dépendantes à se libérer de leur addiction.

les effets de la psilocybine se sont dissipés, S. Lundahl, qui n'avait jamais consommé d'hallucinogènes au préalable, a rempli de nouveaux questionnaires. Elle a indiqué qu'elle avait vécu une expérience de type mystique, semblable à celle rapportée par des personnes en quête de spiritualité dans certaines cultures. Elle s'était alors sentie heureuse et avait perdu le sens du temps et de l'espace. Mais l'état modifié de conscience qu'elle avait vécu durant quelques heures allait changer durablement son humeur.

Des états modifiés de conscience

Un an plus tard, S. Lundahl précisa qu'elle pensait tous les jours à cette expérience et qu'elle était désormais de meilleure humeur et plus satisfaite de sa vie. S. Lundahl était l'une des 36 volontaires ayant participé à notre étude, commencée en 2001 et achevée en 2006, avec un suivi des participants pendant deux ans. La majeure partie de la communauté scientifique a alors salué la renaissance de ce