

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.

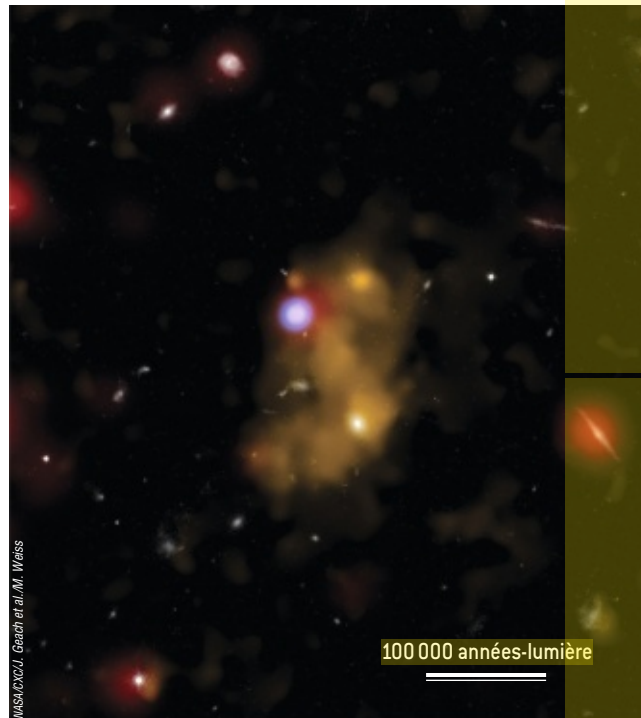
Nous avons déjà pu en entrapercevoir de très prometteuses. Dans l'ultraviolet, le télescope spatial *Hubble* et l'instrument FUSE (*Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer*, dont la mission est achevée) ont détecté une absorption par de l'oxygène fortement ionisé. Les premiers indices nous sont parvenus 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.

Davantage 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-



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.

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

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

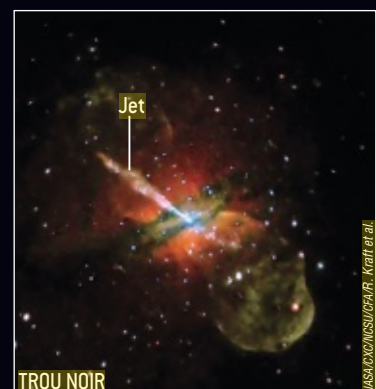
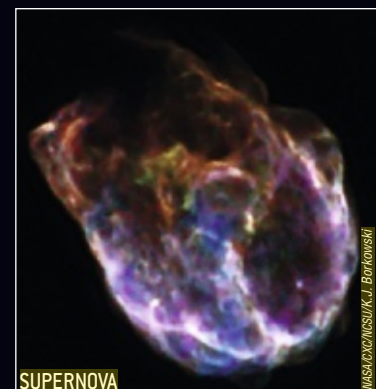
Les simulations qui prennent en compte les processus de rétroaction galactique reproduisent bien mieux la diversité observée des galaxies. Non seulement la rétroaction joue un rôle crucial pour expliquer l'évolution des galaxies, mais c'est un ensemble de processus qui peut aussi réalimenter, réchauffer 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

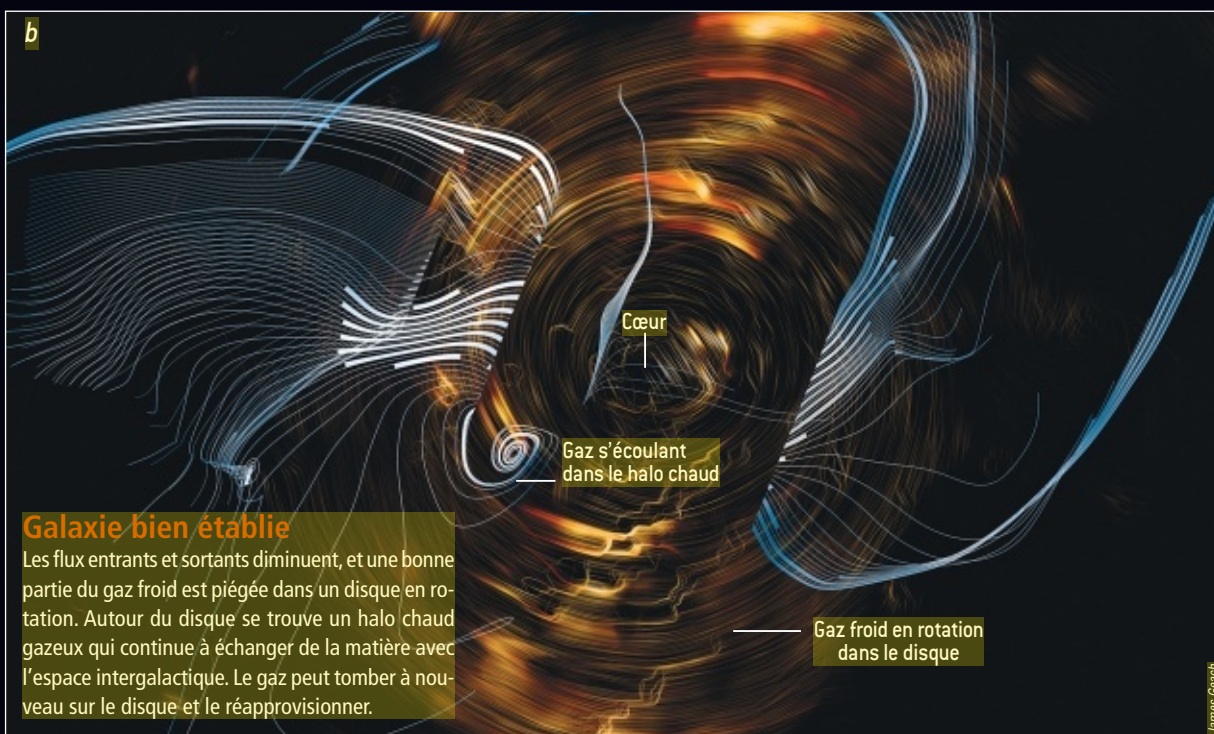
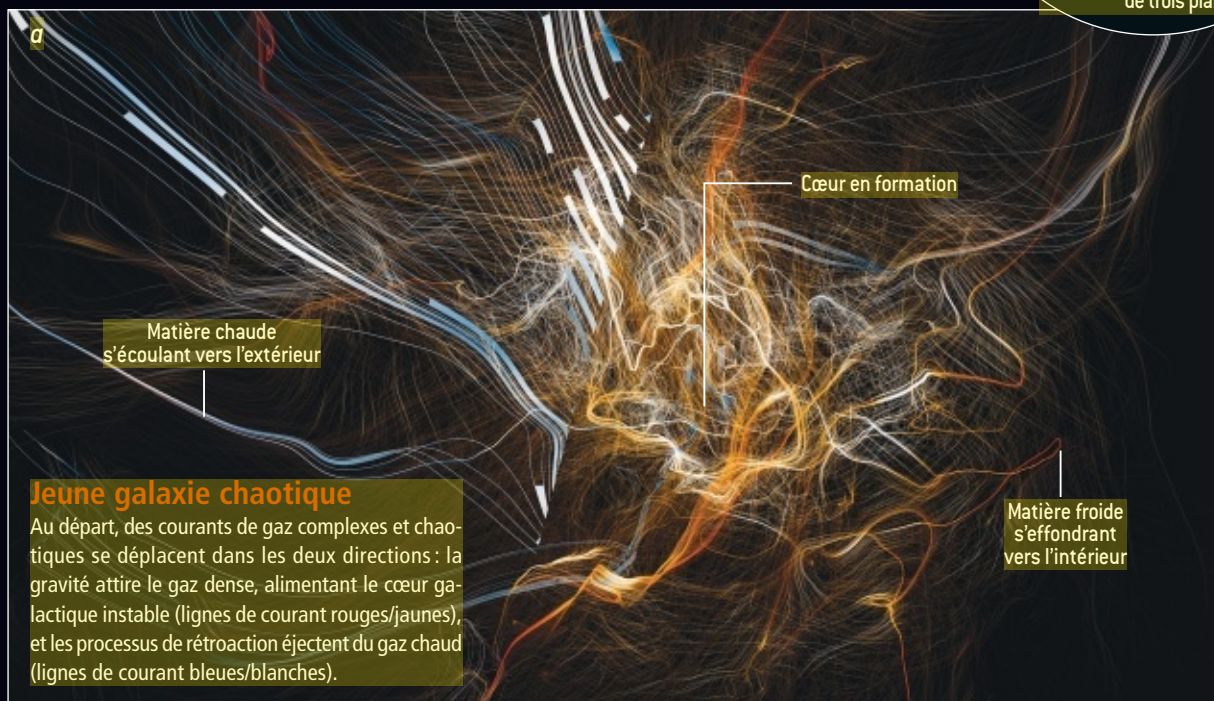
Pourquoi ne trouve-t-on dans les galaxies qu'une faible fraction de la matière cosmique ? Non seulement l'essentiel de la matière aboutit dans le WHIM, mais les galaxies limitent aussi leur propre croissance. Le gaz intergalactique aspiré par leur gravité se condense en étoiles et en trous noirs. Ces 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).



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. ■