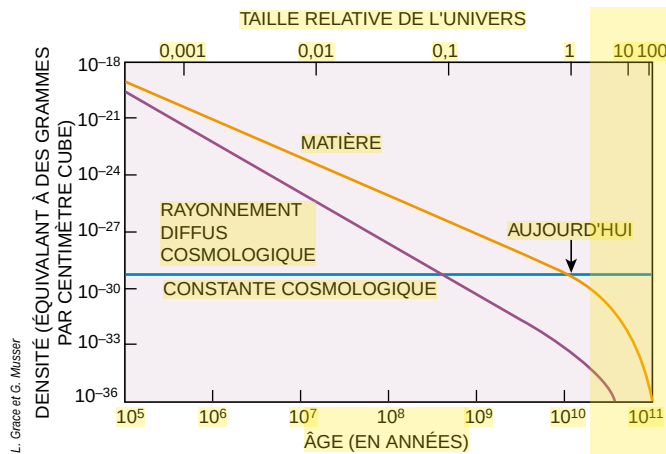


d'étoiles. Or, la mort des étoiles est inéluctable, et la fréquence de leur naissance a chuté depuis le pic initial, qui s'est produit il y a environ dix milliards d'années. Dans 100 000 milliards d'années, les dernières étoiles formées par les processus classiques s'éteindront, et une nouvelle ère commencera. Des mécanismes aujourd'hui trop lents pour être remarqués prédomineront : les systèmes planétaires seront dispersés par les passages d'étoiles proches, la matière, ordinaire ou exotique, se désintégrera, et les trous noirs s'évaporeront lentement.

À quelles limites radicales se heurtera une vie intelligente ? Une civilisation suffisamment évoluée, dans un univers éternel, au volume potentiellement infini, pourrait-elle collecter des quantités infinies de matière, d'énergie et d'information ? Curieusement, non. Même après une éternité de dur labeur bien planifié, les êtres vivants n'accumuleront qu'un nombre fini de particules, une quantité finie d'énergie et un nombre fini de bits d'information. Cet échec est d'autant plus frustrant que le nombre de particules, de joules et de bits disponibles peut croître sans limites. Le problème ne réside pas dans le manque de ressources, mais dans la difficulté de les collecter.

La cause en est l'expansion de l'Univers, qui diminue la densité de ressources disponibles. Quand le rayon de l'Univers double, la densité d'énergie des atomes est divisée par huit. Pour les ondes lumineuses, la décroissance est encore plus rapide : leur densité d'énergie est divisée par 16, parce que la dilatation les disperse tout en allongeant les longueurs d'onde, affaiblissant ainsi leur énergie.

En raison de cette dilution, il faut de plus en plus de temps pour collecter une quantité fixée de ressources.



3. L'EXPANSION DE L'ESPACE agit de différentes façons sur les diverses formes d'énergie. La matière ordinaire (en orange) se raréfie proportionnellement au volume. Le rayonnement cosmologique diffus (en violet) est également dilué, mais, de surcroît, les longueurs d'onde sont allongées (et l'énergie est alors réduite). La densité d'énergie, représentée par la constante cosmologique (en bleu), ne varie pas, du moins selon les théories actuelles.

Deux stratégies s'offrent aux êtres intelligents : laisser la matière venir à eux ou aller la chercher. Dans le premier cas, la meilleure approche à long terme consiste à laisser la gravité opérer. De toutes les forces de la nature, seuls la gravité et l'électromagnétisme attirent les objets à des distances arbitrairement grandes. Toutefois, les forces électromagnétiques sont « écrantées » : des particules de charges opposées se neutralisent, de sorte que les objets sont généralement neutres et, dès lors, insensibles aux forces électriques et magnétiques. En revanche, aucun écrantage de la gravité n'est possible, car les particules ne font que s'attirer.

Abdiquer face au vide

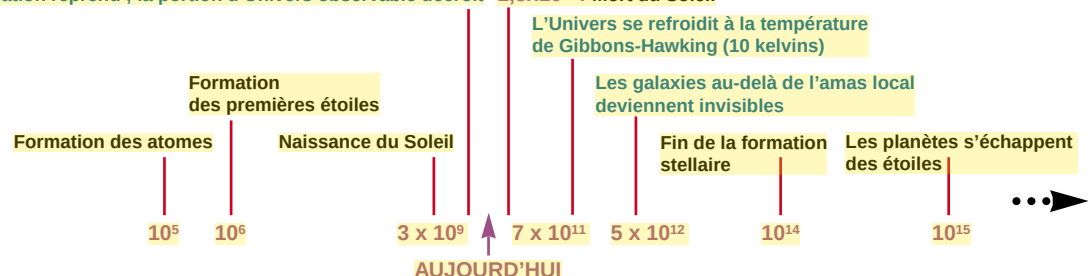
Toutefois, l'expansion de l'Univers écarte les objets et affaiblit ainsi leur attraction mutuelle. Dans tous les modèles d'Univers, excepté un, la gravité ne suffit finalement plus à regrouper des quantités plus grandes de matière. L'Univers aurait déjà atteint ce stade : les amas de galaxies constituent peut-être les structures les plus vastes qui soient liées par la gravité (voir *Les amas de galaxies*, par Patrick

Henry, Ulrich Briel et Hans Böhringer, *Pour la Science*, février 1999). La seule exception concerne un univers en équilibre entre expansion et contraction, où la gravité continue indéfiniment à assembler des quantités toujours plus grandes de matière. Ce scénario semble aujourd'hui contredit par les observations et, de toute manière, il n'offre pas de perspectives très optimistes : dans 10^{33} ans environ, la matière accessible sera si concentrée que la majeure partie s'effondrera en trous noirs, anéantissant toute forme de vie. Sur Terre, tous les chemins mènent peut-être à Rome, mais, dans un trou noir, ils conduisent en un temps fini au centre du trou, où le démembrement et la mort sont inéluctables.

La stratégie de recherche active des ressources n'est, hélas, pas plus efficace que l'approche passive. L'expansion de l'Univers réduit l'énergie cinétique, de sorte que les prospecteurs devraient dilapider leur butin afin de maintenir leur vitesse. Même dans le scénario le plus optimiste – où l'énergie vient au prospecteur à la vitesse de la lumière et est collectée sans pertes –, une civilisation ne pourrait engranger une énergie illimitée que dans un trou noir auprès de celui-ci. En 1982, à l'Institut de technologie de Californie, Steven Frautschi a ainsi calculé que l'énergie tirée des trous noirs s'amenuiserait même plus vite que les coûts de prospection (voir la figure 2). Nous avons récemment réexaminé cette idée et nous avons découvert qu'un trou noir n'amasserait l'énergie indéfiniment que s'il était plus gros que l'Univers visible.

La dilution cosmique de l'énergie serait un handicap considérable si l'Univers se dilatait à vitesse croissante : tous les objets lointains que nous voyons aujourd'hui finiraient par s'éloigner plus vite que la lumière et

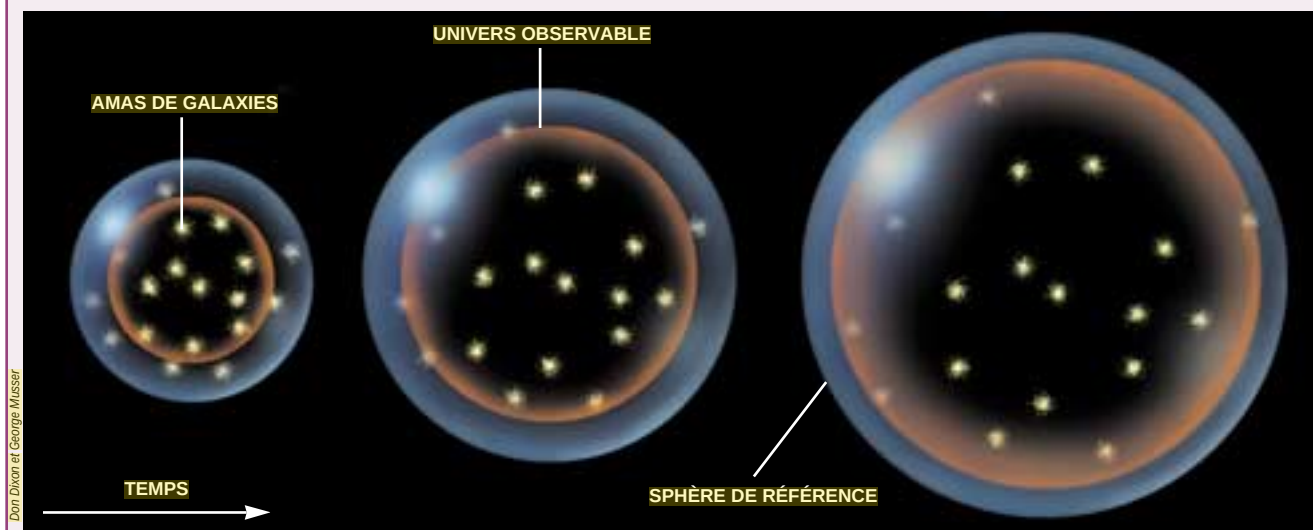
5x10⁹ : L'inflation reprend ; la portion d'Univers observable décroît **1,5x10¹⁰ : Mort du Soleil**



Le pire de tous les univers possibles

De tous les modèles d'univers en expansion perpétuelle, celui qui suppose l'existence d'une «constante cosmologique» est le moins engageant. D'une part, la vie ne peut y durer éternellement et, d'autre part, la qualité de la vie s'y détériore rapidement. Si les observations récentes d'une expansion accélérée (voir *Des supernovae pour sonder l'espace-temps*, par Craig Hogan, Robert Kirshner et Nicholas Suntzeff, *Pour la Science*, mars 1999) se confirment, notre avenir s'annonce sinistre. L'expansion cosmique écarte les objets les uns des autres, à moins qu'ils ne soient liés par la gravité ou par une autre

force. Ainsi, la Voie lactée fait partie d'un amas de galaxies plus grand. Cet amas, d'un diamètre de dix millions d'années-lumière environ, demeure agrégé, tandis que les galaxies hors de l'amas sont emportées à toute vitesse par l'expansion de l'espace intergalactique. La vitesse relative de ces galaxies lointaines est proportionnelle à leur distance. Au-delà d'une distance nommée horizon, la vitesse est supérieure à la vitesse de la lumière (ce que permet la relativité générale, car la vitesse est imprimée par l'expansion de l'espace lui-même). Nous ne pouvons voir plus loin.



L'Univers apparaît très différent aux yeux d'un observateur, selon que son expansion est ralentie (séquence ci-dessus) ou accélérée (séquence de la page ci-contre). Dans les deux cas, l'Uni-

vers est infini, et n'importe quelle portion de l'espace – représentée ici par une sphère de référence, qui englobe les galaxies en jaune vif – grandit. L'observateur ne voit qu'un volume limité,

deviendraient invisibles. Les ressources totales à notre disposition sont donc limitées par ce que nous voyons aujourd'hui (voir l'encadré ci-dessus).

Les diverses formes d'énergie ne se dilueront pas toutes de la même façon. Par exemple, l'Univers pourrait contenir un réseau de cordes cosmiques, des concentrations minces et infiniment longues d'énergie, qui se seraient formées lors du refroidissement de l'Univers primordial. L'expansion ne réduit pas l'énergie par unité de longueur de ces cordes cosmiques (voir *Les cordes cosmiques*, par Alexander Vilenkin, *Pour la Science*, février 1988). Comment profiter de cette manne? Des êtres intelligents pourraient-ils couper une corde, se rassembler aux extrémités et consommer son énergie? Si le réseau de cordes est infini, leur appétit pourrait être

satisfait. Cette stratégie a un grave défaut : si une civilisation trouve le moyen couper des cordes cosmiques, des phénomènes naturels pourraient faire la même chose spontanément. Des trous noirs pourraient naître sur des cordes et les dévorer. Ainsi, les êtres vivants n'absorbent qu'une portion finie de corde avant d'atteindre l'extrémité. Tout le réseau de cordes finirait par disparaître, laissant la civilisation dans la misère.

Peut-on puiser dans le vide quantique? Après tout, l'accélération cosmique résulte peut-être de l'existence de la constante cosmologique, une forme d'énergie qui ne se dilue pas quand l'Univers se dilate (voir *L'anti-gravité*, par Lawrence Krauss, *Pour la Science*, mars 1999). Dans ce cas, l'espace vide est baigné d'un rayonnement étrange, nommé rayonnement de Gib-

bons-Hawking ou de De Sitter. Hélas, l'extraction d'énergie de ce rayonnement à des fins pratiques est utopique : si le vide fournissait de l'énergie, il tomberait dans un état d'énergie inférieur ; or le vide est déjà l'état d'énergie minimale. Quelles que soient notre ingéniosité et la «coopération» de l'Univers, nous devons un jour faire face à la finitude des ressources.

Cette finitude est-elle réhabilitée pour la vie éternelle? L'humanité pourrait-elle réduire sa consommation énergétique, par exemple en réduisant sa température corporelle? Des humains génétiquement modifiés pourraient probablement vivre à des températures un peu inférieures à 37 °C. Toutefois, la température de congélation du sang est une limite à ces tentatives. Viendra un moment où nos descendants devront abandonner leur enveloppe corporelle.

Les trous noirs avalent les galaxies

Au rythme actuel, le combustible galactique s'épuise

10³⁰

10³⁷ ans après le Big Bang