

Le rôle du climat dans la coexistence des derniers hominidés

La coexistence d'*Homo neandertalensis* et d'*Homo sapiens* est une de celles qui posent le plus de questions, tant ces deux groupes sont proches par les niches écologiques qu'ils occupent, par leurs comportements et par leur traits culturels. Ces hommes ont-ils cohabité dans les mêmes paysages pendant de longues périodes, tels les Australopithèques et des premiers *Homo*? Le contraste entre le Proche Orient et l'Europe, établi par Ian Tattersall, mérite d'être discuté.

Au Proche-Orient, des hommes anatomiquement modernes sont connus 100 000 ans avant notre ère, dans deux sites israéliens (Qafzeh et Skhul). De 80 000 à 40 000 ans avant notre ère, seuls les Néandertaliens sont connus dans cette région. Le premier groupe est associé à une faune en partie d'origine africaine, le second à une faune plus septentrionale. Au gré de fluctuations climatiques, la limite entre ces deux domaines fauniques et entre les hommes qui leur étaient associés s'est déplacée parallèlement à la direction Nord-Sud, dans un couloir reliant l'Afrique de l'Est à l'Eurasie. Cette région a donc vu une succession plutôt qu'une cohabitation de groupes humains.

L'équilibre se rompt au début du Paléolithique supérieur. Au cours d'un réchauffement climatique, des hommes modernes, désormais porteurs de techniques et d'organisations sociales nouvelles, se répandent d'Est en Ouest en Europe. Leurs proportions corporelles révèlent leurs origines tropicales. Leur adaptation biologique à leur nouveau milieu mettra plus de 15 000 ans. Le remplacement des Néandertaliens locaux n'a pas été «rapide». Dans un contexte d'occupation humaine discontinue et de très faible densité démographique, les Néandertaliens se maintiennent dans certaines zones géographiques pendant presque 10 000 ans après le début de l'invasion des hommes modernes. La supériorité de ces derniers n'était donc pas écrasante. C'est sans doute le début de la dernière glaciation, il y a 30 000 à 25 000 ans avant notre ère, qui a précipité l'extinction des Néandertaliens, en réduisant les territoires habitables et en exacerbant la compétition entre les deux groupes humains.

Jean-Jacques HUBLIN,
Directeur de recherche au CNRS

se sont généralisées parce que l'environnement a changé. Par exemple, les hominidés ont sans doute possédé un appareil vocal moderne pendant des centaines de milliers d'années avant d'utiliser un langage articulé, structuré de façon complexe. Enfin, l'apparition des caractères est parfois aléatoire, et complètement imprévisible (les propriétés de l'eau ne sont pas déductibles de celles de l'hydrogène et de l'oxygène). L'apparition de la pensée symbolique n'a donc rien d'exceptionnel, même si ses conséquences furent capitales. Aujourd'hui encore, nous ne savons pas comment le cerveau humain nous fait prendre conscience de ce qui se passe dans notre environnement, à partir des décharges électriques et chimiques dans les neurones. En revanche, nous savons qu'avant d'arriver à la pensée symbolique, notre espèce est passée par un état sans symbolique.

À l'arrivée d'*Homo sapiens*, à l'anatomie moderne, des caractères existants se sont peut-être combinés, par l'intermédiaire d'une mutation génétique mineure due au hasard, pour créer un potentiel sans précédent. Pourquoi *Homo sapiens* a-t-il alors continué longtemps d'avoir un comportement archaïque? Peut-être parce qu'il a acquis un comportement moderne grâce à l'apparition d'une innovation biologique qui n'a pas modifié son squelette (c'est-à-dire invisible sur les fossiles). Cependant, cette

espèce d'hominidés aurait alors remplacé toutes les populations de l'Ancien Monde en très peu de temps, ce qui n'est par corroboré par l'archéologie.

Je suppose plutôt que les capacités de l'homme moderne sont apparues avec l'espèce *Homo sapiens*, ou peu après, à l'état latent. Un stimulus culturel les aurait ensuite activées, ce qui se serait traduit par une innovation comportementale. Grâce aux avantages importants qu'elle conférerait, cette innovation se serait rapidement répandue, par simple contact entre les populations qui avaient déjà le potentiel de l'acquérir.

De quelle innovation s'agissait-il? Probablement du langage : grâce à lui, les individus se sont communiqué des idées et des expériences. De surcroît, il

est indispensable au processus même de la pensée. Il impose de classer les objets et les sensations en groupes que l'on nomme et il permet d'associer les symboles mentaux. Aujourd'hui, nous ne pouvons pas concevoir la pensée sans langage. La capacité à former des symboles mentaux est la source de notre créativité : c'est en combinant ces symboles qu'on en vient à se poser des questions du type : «Que se passerait-il si...?»

Malgré les spéculations des linguistes, on ne sait pas comment le langage est apparu. En quel endroit? Au sein de quelle population? Néanmoins, une fois armé de facultés symboliques, *Homo sapiens* est devenu un adversaire redoutable, pas forcément rationnel, comme *Homo neandertalensis* l'a découvert à ses dépens.

Ian TATTERSALL est conservateur au Département d'anthropologie du Muséum d'histoire naturelle de New York. Jay MATTERNES est peintre et sculpteur.

Randall WHITE, *Dark Caves, Bright Visions: Life in Ice Age Europe*, W.W. Norton / American Museum of Natural History, 1986.

Derek BICKERTON, *Language and Species*, University of Chicago Press, 1990.

Ian TATTERSALL, *The Fossil Trail: How We Know What We Think We Know about Human Evolution*, Oxford University Press, 1995.

Christopher STRINGER et Robin MCKIE, *African Exodus: The Origins of Modern Humanity*, Henry Holt, 1997.

William HOWELLS, *Getting Here: The Story of Human Evolution*, Compass Press, 1997.

Ian TATTERSALL, *The Last Neanderthal: The Rise, Success and Mysterious Extinction of Our Closest Human Relatives*, Macmillan, 1995 ; deuxième édition : Westview Press, décembre 1999.

The Origin and Diversification of Language, sous la direction de Nina G. Jablonski et Leslie C. Aiello, University of California Press, 1998.

Le destin ultime de la vie

LAWRENCE KRAUSS • GLENN STARKMAN

Des milliards d'années durant, l'Univers était trop chaud pour que la vie apparaisse. Dans un avenir très lointain, il deviendra si froid et si vide que la vie, aussi ingénieuse soit-elle, sera oblitérée.

La croyance en la vie éternelle est au cœur de nombreuses religions. On imagine un paradis spirituel, une existence dépourvue de douleur, de mort ou de mal. Dans le royaume temporel, nous aspirons à une autre sorte de vie éternelle, évoquée par Charles Darwin dans la conclusion de *l'Origine des espèces* : «Comme toutes les formes actuelles de la vie descendent en ligne directe de celles qui vivaient longtemps avant l'époque cumbrienne, nous pouvons être certains que la succession régulière des générations n'a jamais été interrompue [...]. Dès lors, nous pouvons compter avec quelque confiance sur un avenir d'une incalculable longueur.» Nombre d'auteurs de science-fiction ont repris l'idée de Darwin. Ils ont reconnu que, lorsque le Soleil aura épuisé ses réserves d'hydrogène, la vie que nous connaissons sur notre planète s'éteindra. Cependant, l'espèce humaine est résistante, et nos descendants chercheront de nouveaux havres, se disséminant dans chaque recoin de l'Univers, à l'instar des organismes qui ont colonisé toutes les niches possibles de la Terre. Le mal, la douleur et la mort ne disparaîtront peut-être jamais, mais nous espérons que, quelque part dans l'Univers, certains de nos descendants survivront.



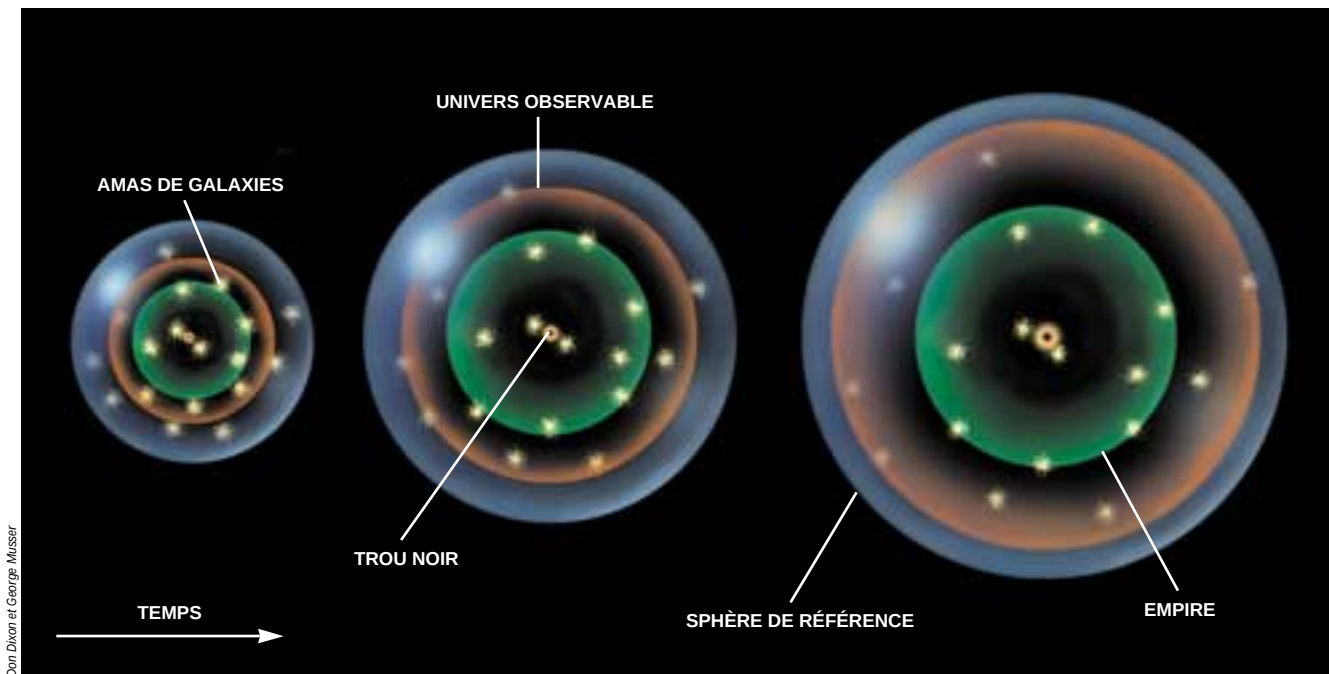
1. DEPUIS LE BIG BANG, l'Univers a évolué en plusieurs étapes qui sont indiquées sur la bande qui court tout le long de cet article, en pied de page. Lorsque les dernières étoiles s'éteindront, les êtres intelligents devront trouver de nouvelles sources d'énergie, telles les cordes cosmiques (*fil violet sur cette page*). Malheureusement, des mécanismes naturels – comme des éruptions de trous noirs – érodent ces concentrations linéaires d'énergie, ce qui obligera finalement les formes vivantes à chercher d'autres moyens de subsistance. Comme les mécanismes moteurs de l'Univers agissent sur des échelles de temps très différentes, le temps est sur une échelle logarithmique. Si aujourd'hui l'expansion de l'Univers accélère, des effets supplémentaires (*en bleu sur la ligne du temps*) rendront la vie encore plus difficile.

Séparation de l'espace et du temps

Inflation

10^{-51} an depuis le Big Bang

10^{-44}



Don Dixon et George Musser

2. EN ANALYSANT LA STRATÉGIE de récupération d'énergie élaborée par le physicien Steven Frautschi, de l'Institut de technologie de Californie, on comprend pourquoi l'humanité survivra difficilement dans le futur très lointain, de l'ordre de 10^{100} ans. Dans de nombreuses théories cosmologiques, les ressources se multiplient quand l'Univers – et tout volume arbitraire qu'il contient (*sphère bleue*) – se dilate et qu'une fraction de plus en plus grande devient observable

(*sphère rouge*). Une civilisation pourrait utiliser un trou noir pour transformer en énergie de la matière, captée dans l'«empire» du trou noir (*sphère verte*). Toutefois, à mesure que cet empire grossit, la conquête de nouveaux territoires est de plus en plus coûteuse ; la dilution de la matière l'emporte finalement. En effet, la matière deviendra si diluée que l'humanité ne pourra plus construire un trou noir suffisamment grand pour la récupérer.

Est-ce bien sûr ? La science ne connaît encore ni les fondements physiques de la vie ni ceux de l'expansion de l'Univers, mais le destin ultime de la vie n'est pas imprévisible. Les observations cosmologiques récentes indiquent notamment que l'Univers ne se recontractera pas, après avoir atteint une taille maximale : son expansion se poursuivra indéfiniment. Ainsi, la vie n'est pas menacée d'un «grand écrasement» flamboyant au cours duquel toute civilisation serait effacée. La nouvelle semble bonne : pourquoi une civilisation intelligente n'utiliserait-elle pas les inépuisables ressources de l'Univers pour survivre perpétuellement ?

Néanmoins, la vie se nourrit d'énergie et d'information, qui, selon des arguments scientifiques très généraux, ne peuvent être récupérées qu'en quantités finies, même en un temps infini. Pour persister, la vie devra s'accommoder de ressources décroissantes et d'une connaissance limitée. Dans ces conditions, aucune forme significative de conscience ne pourra subsister indéfiniment.

Les déserts d'une vaste éternité

Depuis un siècle, l'eschatologie scientifique (l'étude du sort ultime de l'homme et de l'Univers) a oscillé entre optimisme et pessimisme. Peu après la prédiction confiante de Darwin, les scientifiques se sont inquiétés de la «mort thermique», une époque lointaine où le cosmos, stabilisé à une température uniforme, n'évoluerait plus. Puis, dans les années 1920, la découverte de l'expansion de l'Univers a dissipé cette crainte : l'expansion indéfinie préviendrait la stabilisation thermodynamique. Toutefois, peu de cosmologistes ont envisagé les autres conséquences sur la vie d'un Univers en expansion perpétuelle, jusqu'à la parution, en 1979, d'un article du physicien Freeman Dyson, de l'Institut d'études avancées de Princeton. F. Dyson se fondait sur des résultats de Jamal Islam, de l'Université de Chittagong, au Bangladesh ; plusieurs physiciens et astronomes ont poursuivi son travail en l'actualisant. L'an dernier,

nous avons décidé de réexaminer la question quand ont été publiées de nouvelles observations qui conduisent à imaginer une évolution de l'Univers bien différente de celle que l'on prévoyait jusqu'alors.

Depuis 12 milliards d'années, l'Univers a beaucoup évolué. Extraordinairement chaud et dense, il s'est dilaté et refroidi. Des centaines de milliers d'années durant, le rayonnement a dominé ; le «fond diffus cosmologique» qui a été mesuré par le satellite *COBE* en 1992, est considéré comme un vestige de cette ère. Ce rayonnement correspond à celui d'un corps à une température de 3 kelvins, soit environ -270°C . Puis la matière s'est imposée, et des structures de plus en plus grandes se sont condensées. Aujourd'hui, si les observations cosmologiques récentes sont correctes, la dilatation de l'Univers s'accélère, signe probable qu'un nouveau type d'énergie, émanant peut-être de l'espace lui-même, prend le relais.

La vie que nous connaissons n'existe que si des planètes tournent autour

Apparition de l'électromagnétisme

10^{-18} an depuis le Big Bang

Synthèse des noyaux atomiques

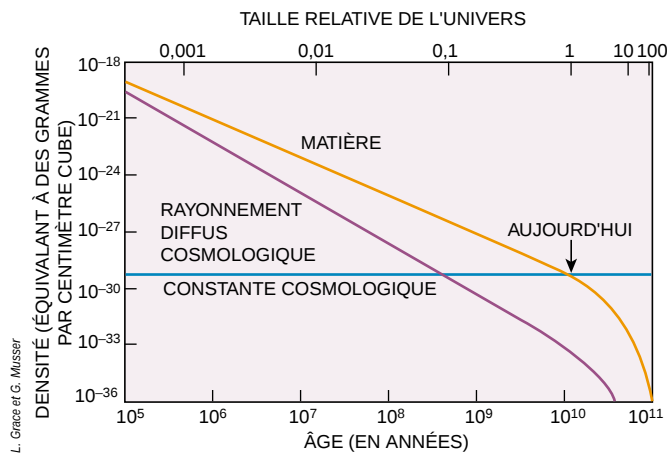
10^{-5}

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

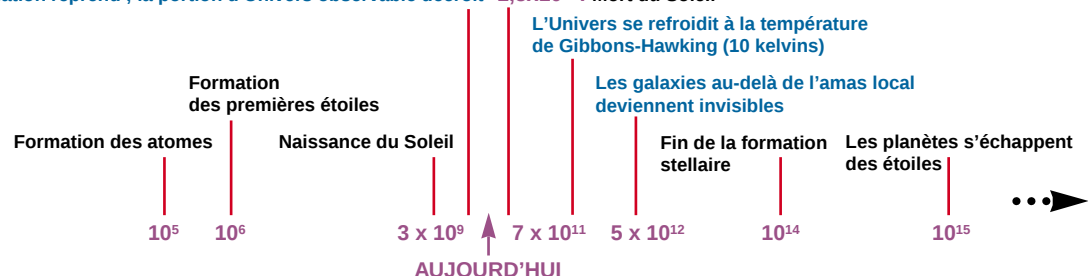
Henry, Ulrich Briel et Hans Böhringer, *Pour la Science*, février 1999). La seule exception concerne un univers en équilibre entre expansion et contraction, où la gravité continue indéfiniment à assembler des quantités toujours plus grandes de matière. Ce scénario semble aujourd'hui contredit par les 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

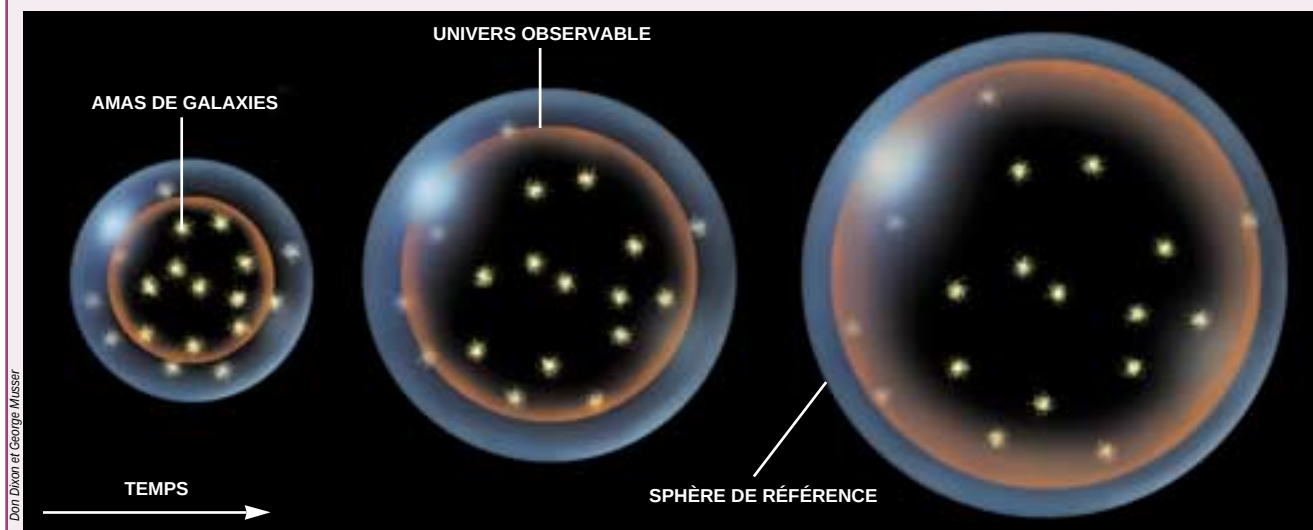
5x10⁹ : L'inflation reprend ; la portion d'Univers observable décroît **1,5x10¹⁰ : Mort du Soleil**



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 réhabilitatoire 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

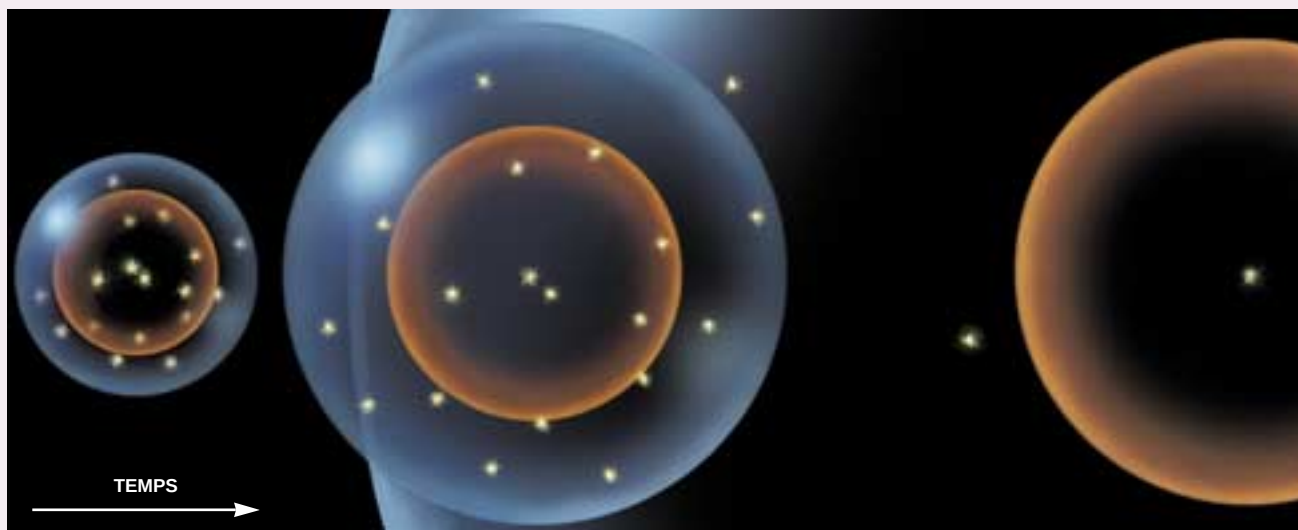
10³⁰

10³⁷ ans après le Big Bang

Si, comme semblent le montrer les observations, l'Univers possède une constante cosmologique positive, l'expansion accélère et les galaxies s'écartent de plus en plus rapidement. Leur vitesse est toujours proportionnelle à leur distance, mais la constante de proportionnalité ne varie pas, au lieu de diminuer avec le temps comme dans un univers dont l'expansion ralentit. Par conséquent, les galaxies qui sont aujourd'hui au-delà de notre horizon resteront toujours hors de vue. Même les galaxies que nous observons aujourd'hui – excepté celles de l'amas local – atteindront la vitesse de la lumière et disparaîtront à nos yeux. L'accélération, qui ressemble à l'inflation de l'Univers primordial, a commencé

quand l'Univers était environ deux fois plus jeune qu'aujourd'hui, il y a plus de cinq milliards d'années.

La disparition des galaxies lointaines sera progressive. La longueur d'onde de leurs rayonnements s'allongera jusqu'à devenir indétectable. Simultanément, la quantité de matière observable diminuera, et le nombre de mondes accessibles à nos vaisseaux spatiaux décroîtra. Dans 2 000 milliards d'années, bien avant l'extinction des dernières étoiles de l'Univers, tous les objets hors de notre propre amas de galaxies ne seront plus observables ou accessibles. Il n'y aura plus aucun nouveau monde à conquérir. Nous serons alors vraiment seuls dans notre coin d'Univers.



qui gonfle parce que les signaux lumineux se propagent (*sphère rouge*). Si l'expansion ralentit, l'observateur aperçoit une partie de plus en plus grande de l'Univers ; de plus en plus de galaxies

remplissent le ciel. En revanche, si l'expansion accélère, la fraction observable de l'Univers diminue ; l'espace semble alors se vider de toute galaxie.

Cette idée futuriste ne présente pas de difficultés fondamentales. Elle suppose simplement que la conscience n'est pas liée à un ensemble particulier de molécules organiques, mais qu'elle peut être incarnée dans une multitude de formes différentes, des robots aux nuages interstellaires sensibles (voir *Laisserons-nous la Terre à des robots ?* par Marvin Minsky, *Pour la Science*, décembre 1994). Nombre de philosophes modernes et de cognitivistes considèrent la pensée consciente comme un processus réalisable par un ordinateur. Nous ne discuterons pas cette thèse ici (ce qui est commode, car nous ne sommes pas compétents pour le faire), mais nous nous contenterons de signaler que l'humanité aura plusieurs milliards d'années pour concevoir des incarnations physiques où elle transfèrera un jour les consciences.

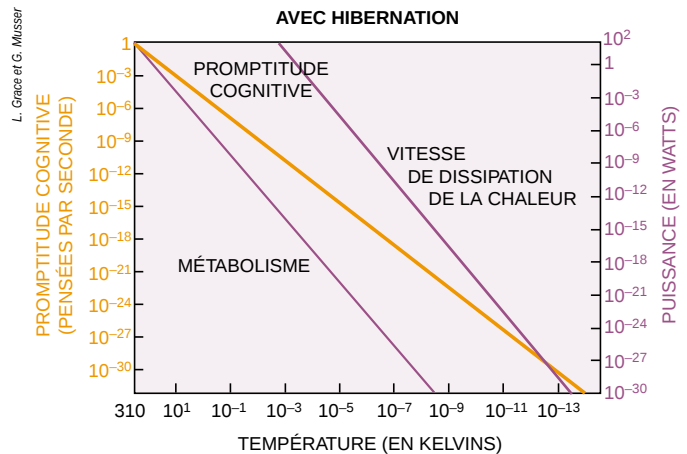
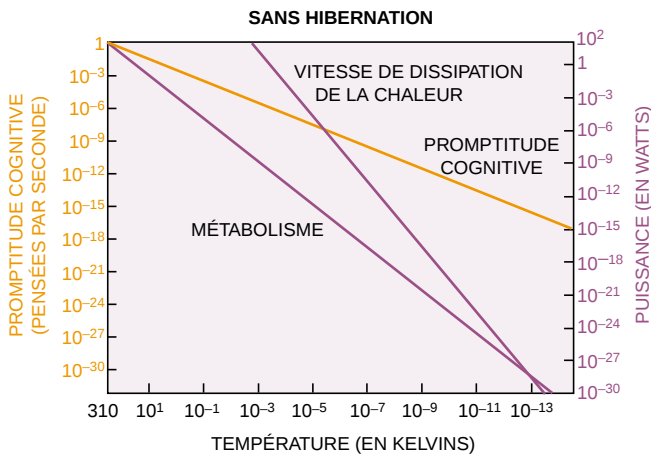
Afin de réduire la consommation énergétique, ces «corps» nouveaux devront fonctionner à des températures très basses et avoir des métabolismes plus lents que nos corps d'aujourd'hui.

F. Dyson a calculé que, si les organismes ralentissaient leur métabolisme alors que l'Univers se refroidit, ils pourraient consommer une quantité d'énergie totale finie sur toute l'éternité. Les consciences seraient également ralenties (mesurées, par exemple, par le nombre de pensées par seconde), mais le nombre total de pensées pourrait rester illimité. En bref, les êtres intelligents survivraient éternellement, pas seulement en temps absolu, mais aussi en temps subjectif : tant que les organismes seront assurés d'avoir des pensées en nombre infini, ils ne se formaliseront pas d'une vie ralentie. Le marché – ralentissement du métabolisme contre vie

éternelle – semble avantageux, mais l'infini n'est pas intuitif. Un organisme ne maintient le même degré de complexité que si la vitesse de traitement de l'information est proportionnelle à la température du corps, tandis que la vitesse de consommation d'énergie est proportionnelle au carré de la température (le facteur additionnel de température provient de lois thermodynamiques fondamentales). Ainsi, les besoins de puissance diminuent plus vite que la promptitude cognitive (voir la figure 4, à gauche). À 37 °C, le corps humain dépense environ 100 watts. À -118 °C, un organisme de complexité équivalente penserait deux fois moins vite, mais consommerait un quart de la puissance. Le compromis est acceptable, parce que les mécanismes physiques dans l'environnement ralentissent au même rythme.

L'effet tunnel liquéfie la matière

10⁶⁵



4. LA VIE sera-t-elle éternelle si la réserve d'énergie est finie ? Si l'humanité réduisait sa température corporelle à moins de 37 °C, elle consommerait moins de puissance, au prix d'une activité cérébrale ralentie (graphique de gauche). Comme le métabolisme déclinerait plus vite que la vitesse de pensée, cette forme de vie pourrait s'arranger pour avoir un nombre infini de pensées à l'aide de ressources limitées. Toutefois, elle dissiperait moins bien la chaleur perdue, de sorte qu'elle ne parviendrait pas aux températures inférieures à

10⁻¹³ kelvin environ. L'hibernation partielle (graphique de droite) résoudrait le problème de la dissipation de la chaleur. En se refroidissant, la forme de vie passerait une fraction croissante de son temps en léthargie, réduisant encore son métabolisme moyen et sa vitesse de pensée. Ainsi, la puissance consommée demeurerait toujours inférieure à la puissance dissipée sous la forme de chaleur, tout en autorisant un nombre infini de pensées. Toutefois, un scénario de ce genre pourrait buter sur d'autres écueils, telles des limites quantiques.

Dormir, c'est mourir un peu

Malheureusement, une difficulté subsiste. Un corps s'échauffe s'il ne dissipe pas en chaleur l'essentiel de la puissance qu'il consomme. Par exemple, le corps humain est refroidi par l'émission d'un rayonnement infrarouge, émis par la peau. À très basse température, le radiateur le plus efficace est un gaz dilué d'électrons. Or, le rendement de ce radiateur optimal, proportionnel au cube de la température, décroît plus vite que le ralentissement du métabolisme. À partir d'une limite, les organismes ne peuvent plus abaisser leur température, à moins de réduire leur complexité, de s'abêtir.

Ces conclusions n'ont pas découragé F. Dyson, qui a élaboré une stratégie d'hibernation qui compenserait l'inefficacité des radiateurs : les organismes ne passeraient qu'une petite partie du temps en état d'éveil ; en dormant, leur métabolisme diminuerait tout en continuant à dissiper de la chaleur. De cette manière, ils atteindraient des températures corporelles moyennes bien inférieures (voir la figure 4, à droite). En dormant une proportion croissante de leur temps, ils consommeraient une quantité finie

d'énergie, mais existeraient éternellement et entreprendraient une infinité de pensées. Selon cette analyse, la vie éternelle est possible.

Depuis la publication des calculs de F. Dyson, plusieurs difficultés sont apparues. D'abord, F. Dyson supposait que la température moyenne de l'espace profond – aujourd'hui, les 2,7 kelvins du rayonnement diffus cosmologique – continuerait à diminuer avec l'expansion, de sorte que les organismes pourraient toujours abaisser leur température. Toutefois, si l'Univers possède une constante cosmologique, la température a un plancher absolu, fixé par le rayonnement de Gibbons-Hawking. Selon les estimations actuelles de la valeur de la constante cosmologique, ce rayonnement a une température effective de 10⁻²⁹ kelvin. Quand les organismes auront atteint cette température, ils ne pourront plus se refroidir.

D'autre part, F. Dyson a oublié que les organismes devraient disposer d'horloges afin de se réveiller périodiquement. Ces horloges devraient comptabiliser des durées de plus en plus longues avec de moins en moins d'énergie. Or, la mécanique quantique montre que de telles horloges sont impossibles. Considérons par exemple une horloge composée de deux petites

billes très éloignées et lancées l'une vers l'autre ; une sonnerie retentit lorsqu'elles se heurtent. Pour allonger la durée entre les sonneries, les organismes lanceraient les billes à des vitesses inférieures. Toutefois, ils seraient limités par le principe d'incertitude d'Heisenberg : aux vitesses trop faibles, la position des billes deviendrait imprécise ; à la limite, les horloges ne sonneraient plus et l'hibernation se transformerait en repos éternel.

Le disque rayé

Le troisième doute, et le plus général, sur la viabilité à long terme d'une vie intelligente résulte de limitations fondamentales sur le calcul. Longtemps, les informaticiens ont pensé que tout calcul nécessitait une quantité minimale d'énergie par opération, quantité proportionnelle à la température de l'ordinateur. Puis, au début des années 1980, les physiciens ont compris que certains mécanismes physiques, tels les effets quantiques ou le mouvement brownien de particules dans un fluide, pouvaient servir de base à un ordinateur sans pertes (voir *Les limites physiques du calcul*, par Charles Bennett et Rolf Landauer, *Pour la Science*, septembre

Les électrons et les positons se lient en une nouvelle forme de matière

Les trous noirs galactiques s'évaporent

10⁸⁵ ans après le Big Bang

10⁹⁸

1985). De tels ordinateurs fonctionneraient avec une quantité arbitrairement petite d'énergie : pour utiliser moins d'énergie, ils ralentiraient, tout comme les organismes éternels. Ce fonctionnement à basse énergie nécessite deux conditions : ces ordinateurs doivent rester en équilibre thermodynamique avec leur environnement, et ils ne doivent jamais jeter de l'information, sous peine de rendre le calcul irréversible (un processus irréversible dissipe de l'énergie).

Ces conditions ne sont pas vérifiées dans un univers en expansion. Comme l'expansion dilue les rayonnements en allongeant leur longueur d'onde, les organismes n'émettent ou n'absorbent progressivement plus assez d'énergie, sous forme de rayonnement, pour rester en équilibre thermique avec leur environnement. Avec une quantité finie de matière à leur disposition, et donc une mémoire finie, ils devraient finalement oublier une ancienne idée pour en avoir une nouvelle. Quel genre d'existence perpétuelle ces organismes mèneraient-ils ? Ils ne pourraient collecter qu'un nombre fini de particules et une quantité finie d'information. Comme les pensées sont des réorganisations de l'information, une information finie implique un nombre fini de pensées. Les organismes seraient piégés dans le passé, ayant indéfiniment les mêmes idées. L'éternité deviendrait une prison au lieu d'un horizon de créativité et d'exploration. Est-ce vivre ?

Notons que F. Dyson n'a pas renoncé. Dans la correspondance que nous avons échangée, il a proposé que la vie évite les contraintes quantiques sur l'énergie et sur l'information grâce à une augmentation de taille, par exemple, ou en utilisant d'autres

types de mémoire. Selon ses termes, la question est de savoir si la vie est «analogique» ou «numérique», c'est-à-dire si c'est la physique classique ou la physique quantique qui impose les limites. Nous pensons qu'à long terme la vie est numérique.

Y a-t-il un autre espoir de vie éternelle ? Alors que la mécanique quantique telle que nous la connaissons semble imposer des contraintes rédhibitoires à la poursuite indéfinie de la vie, certains de ses développements pourraient, au contraire, nous tirer de ce mauvais pas. Par exemple, si une utilisation judicieuse de la théorie quantique de la gravitation conduisait à sauter d'un point à un autre de l'espace-temps par des «trous de ver», des formes vivantes pourraient visiter des parties de l'Univers inaccessibles aux êtres limités par la vitesse de la lumière et collecter des quantités infinies d'énergie et d'information. Elles pourraient aussi construire des bébés univers (voir *L'univers inflatoire autoreproducteur*, par Andreï Linde, *Pour la Science*, janvier 1995) et se propulser, ou envoyer un ensemble d'instructions pour se reproduire, dans des bébés univers.

Les limites ultimes sur la vie ne deviendront notables que sur des échelles de temps vraiment cosmiques (si l'on rapporte 10^{100} ans à la durée de vie humaine, l'âge de l'Univers actuel correspondrait à 10^{-90} seconde). Certains sont troublés que la vie, au moins dans son incarnation physique, doive se terminer, mais n'est-il pas remarquable que, malgré notre connaissance limitée, nous puissions tirer des conclusions sur ces questions eschatologiques ? Être conscient de l'évolution de l'Univers et de notre destinée en son sein est sans doute un cadeau bien plus grand que de pouvoir l'habiter éternellement.

PRIX "INTERBREW-BAILLET LATOUR DE LA SANTÉ" 2001



DOMAINE
D'APPLICATION :

LA TUBERCULOSE

MONTANT DU PRIX

Le Prix s'élèvera à six millions de francs belges (6 000 000 BEF – 150 000 EUROS).

Le Prix est décerné à une personnalité dont les activités sont axées sur la recherche scientifique et/ou sur les applications pratiques de celle-ci. Le Prix est destiné à reconnaître les mérites du lauréat et à promouvoir la poursuite de ses travaux.

Les candidats peuvent être de nationalité belge ou étrangère

Les candidatures doivent parvenir à la Secrétaire générale du Fonds National de la Recherche Scientifique, rue d'Egmont 5 à B - 1000 Bruxelles (Belgique) avant le 15 septembre 2000. La personnalité qui introduit la candidature doit joindre à celle-ci un mémoire sur les mérites du candidat, mémoire rédigé en anglais et comprenant au moins trois pages.

RÈGLEMENT :

Le règlement est à votre disposition au secrétariat du Fonds National de la Recherche Scientifique, rue d'Egmont 5 à B - 1000 Bruxelles, tél. : 02/504.92.11, fax : 02/504.92.92, e-mail : mjsimoen@fnrs.be

Lawrence KRAUSS et Glenn STARKMAN travaillent dans le Département de physique de l'Université Case Western Reserve, à Cleveland.

Freeman J. DYSON, *Time without End : Physics and Biology in an Open Universe*, in *Reviews of Modern Physics*, vol. 51, n° 3, pp. 447-460, juillet 1979.

John D. BARROW et Frank J. TIPLER, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, 1988.

Paul C.W. DAVIES, *The Last Three*

Minutes : Conjectures about the Ultimate Fate of the Universe, HarperCollins, 1997.

Fred ADAMS et Greg LAUGHLIN, *The Five Ages of the Universe : Inside the Physics of Eternity*, Free Press, 1999.

Lawrence M. KRAUSS, *Quintessence : The Mystery of the Missing Mass*, Basic Books, 1999.

Lawrence M. KRAUSS et Glenn D. STARKMAN, *Life, the Universe and Nothing : Life and Death in an Ever-Expanding Universe*, in *Astrophysical Journal*, à paraître.

