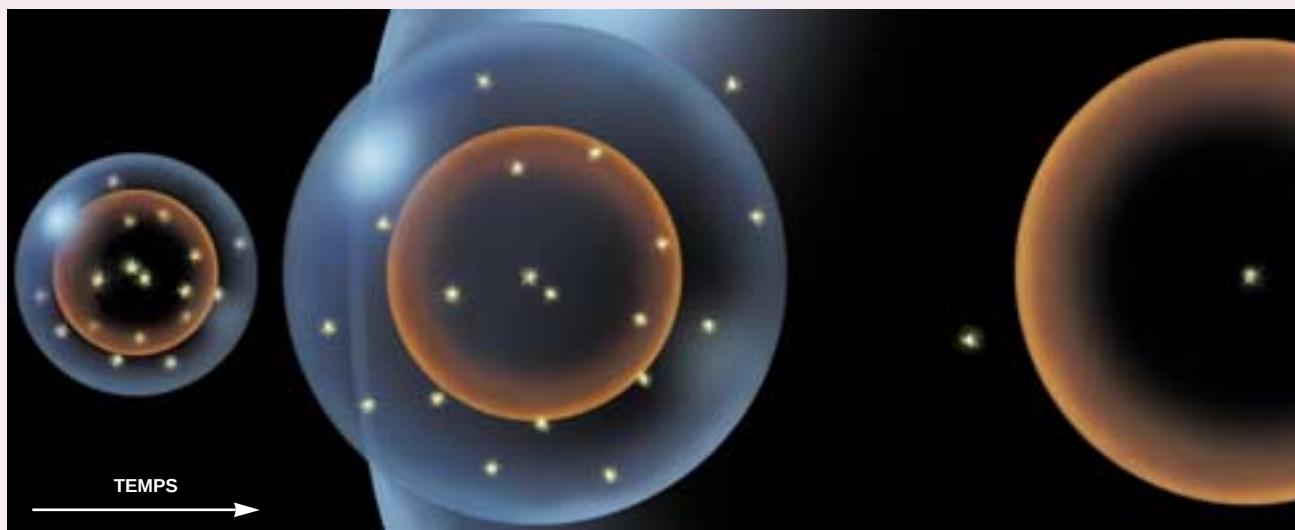


Si, comme semblent le montrer les observations, l'Univers possède une constante cosmologique positive, l'expansion accélère et les galaxies s'écartent de plus en plus rapidement. Leur vitesse est toujours proportionnelle à leur distance, mais la constante de proportionnalité ne varie pas, au lieu de 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.

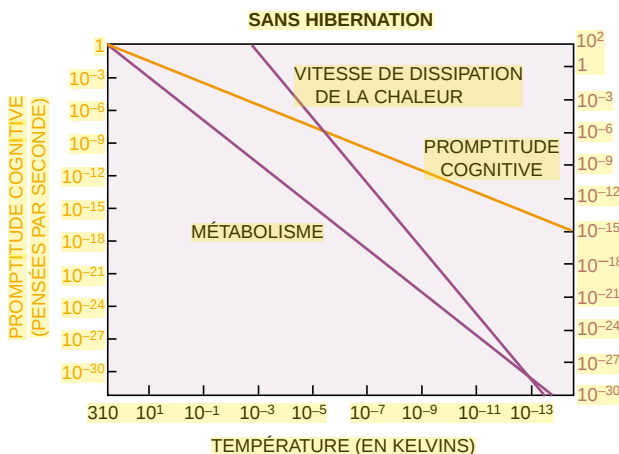
Afin de réduire la consommation énergétique, ces «corps» nouveaux devront fonctionner à des températures très basses et avoir des métabolismes plus lents que nos corps d'aujourd'hui.

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

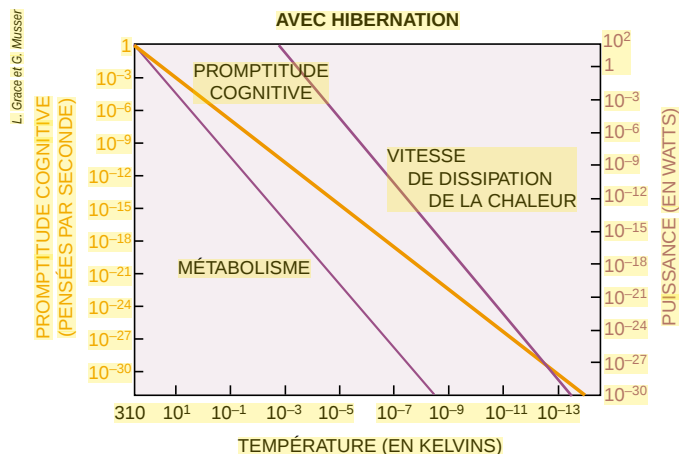
éternelle – semble avantageux, mais l'infini n'est pas intuitif. Un organisme ne maintient le même degré de complexité que si la vitesse de traitement de l'information est proportionnelle à la température du corps, tandis que la vitesse de consommation d'énergie est proportionnelle au carré de la température (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 entretiendraient 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

10⁹⁵ 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.