

# Nucléaire

## UN CONCEPT INNOVANT : LES RÉACTEURS À SELS FONDUS

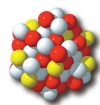
→ Pour satisfaire les futurs besoins énergétiques, devant la raréfaction des énergies fossiles et les problèmes environnementaux qu'elles génèrent, la filière nucléaire pourrait se développer. Toutefois, celle-ci, pour répondre aux diverses exigences (notamment de sûreté et de développement durable), doit développer de nouveaux concepts de réacteurs dits de « quatrième génération ». Parmi eux, le réacteur à sels fondus constitue une voie prometteuse.

Daniel Heuer  
directeur de recherche  
au C.N.R.S.-IN2P

Elsa Merle-Lucotte  
maître de conférences  
à Grenoble I.N.P./  
C.N.R.S.-IN2P3

### → CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE ET PRODUCTION D'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

En 2006, la consommation énergétique moyenne mondiale était de 1,8 tonne équivalent pétrole (tep, cette unité d'énergie étant égale à 11,6 mégawattheures) par an et par personne. Ce chiffre cache une grande diversité géographique, avec par exemple une moyenne de 7,7 tep par an pour un Américain du Nord et de 0,5 tep par an pour un habitant de l'Inde. Quels que soient les scénarios envisagés à l'horizon de 2050, les besoins énergétiques ne cessent de croître du fait de l'augmentation de la population mondiale et du fort développement des pays émergents. Une part importante de cette augmentation se fera en Asie, principalement en Chine et en Inde. Quant aux pays développés, s'ils déploient des efforts d'efficacité énergétique et de maîtrise de l'énergie,



### LES CYCLES DU COMBUSTIBLE

Les réacteurs nucléaires utilisent la propriété particulière de certains noyaux de fissionner en deux noyaux plus petits lorsqu'ils absorbent un neutron, libérant ainsi de l'énergie. Ces noyaux sont dits « fissiles » et seul l'uranium 235, parmi les noyaux présents dans la nature, a cette propriété. Les ressources en uranium 235 étant limitées, il sera indispensable de produire artificiellement

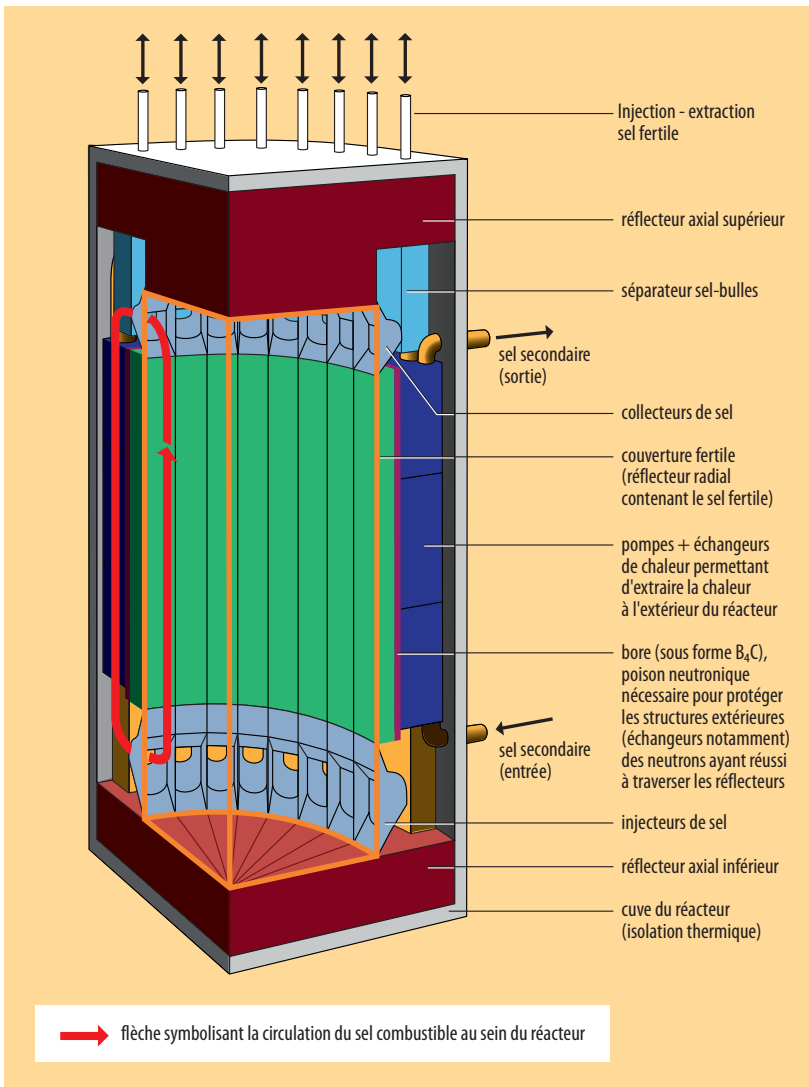
d'autres types de noyaux fissiles. Il existe deux façons de le faire directement dans des réacteurs nucléaires, ce sont les deux « cycles du combustible » possibles.

Le premier de ces cycles, déjà partiellement utilisé dans les réacteurs actuels, est le cycle uranium/plutonium (U/Pu). Dans ce cycle, une capture neutronique sur un noyau d'uranium 238 conduit à la production d'un plutonium 239 qui est fissile. L'uranium 238, qui représente 99,7 p. 100 de l'uranium naturel, est alors nommé « noyau fertile ».

Le second seul autre cycle possible est celui du thorium/uranium (Th/U). Dans ce cas, une capture neutronique par noyau de thorium 232, seul isotope naturel du thorium, mène à la produc-

tion d'un uranium 233 qui est fissile. Les réserves naturelles de thorium sont deux à trois fois plus importantes que celles d'uranium naturel.

Dans chacun des deux cycles, les neutrons produits lors d'une fission doivent non seulement provoquer une autre fission pour entretenir la réaction en chaîne, mais aussi produire un nouveau noyau fissile par capture sur un noyau fertile. Lorsque cette dernière condition est remplie, on dit que le réacteur est régénérateur, et le seul combustible nécessaire au fonctionnement du réacteur, après une première et unique charge initiale de noyaux fissiles, devient le noyau fertile, présent sur Terre en quantité très importante.



1. Schéma de principe d'un réacteur à sels fondus en cycle thorium. Le sel combustible, non représenté ici, se situe à l'intérieur des lignes orange.

ils devront toutefois modifier leur type de production qui est aujourd'hui essentiellement fondée sur les énergies fossiles (hormis quelques pays dont la France). La production d'énergie nucléaire peut alors jouer un rôle déterminant dans la lutte contre le changement climatique, à condition qu'il soit possible d'au moins décupler la puissance installée dans le monde d'ici à 2050.

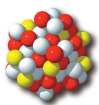
## → VERS LA GÉNÉRATION IV

Si ce défi est réalisable, dans un premier temps, avec les réacteurs actuels (générations II et, bientôt, III), il se heurtera, d'ici à la fin du  $XXI^e$  siècle, aux limites des ressources mondiales en uranium fissile naturel, combustible essentiel de ces réacteurs. Le terme « génération » pour les réacteurs désigne les ruptures technologiques et les diverses améliorations que le nucléaire civil a connues depuis son origine dans les

années 1950. Au sein d'une même génération, on distingue différentes filières (ou types) de réacteurs nucléaires, qui sont caractérisées par leur combustible (matière, forme), leur fluide caloporteur (matière utilisée pour extraire la chaleur produite), leur spectre neutronique (dit « thermique » si les neutrons sont ralentis, « rapide » sinon) et, enfin, dans le cas d'un spectre neutronique thermique, par leur modérateur (élément permettant de ralentir la vitesse des neutrons pour assurer une réaction en chaîne efficace). Les installations aujourd'hui en exploitation sont dites de génération II (la première génération regroupant les réacteurs construits avant 1970), principalement représentées par des réacteurs refroidis à l'eau, utilisant de l'uranium comme combustible et fondés sur des spectres neutroniques thermiques : réacteurs à eau pressurisée ou R.E.P., réacteurs à eau bouillante ou R.E.B., réacteurs Candu – Canada deutérium uranium –, réacteurs soviétiques R.B.M.K. (*Reaktor Bolchoï Mochtchnosti Kanalnogotipa*) et V.V.E.R. (*Vodo Vodiano Energuetitchesk Reaktor*). La génération III est prête à prendre le relais d'ici à 2015, avec par exemple l'*European Pressurized Reactor* (E.P.R.) franco-allemand et l'AP1000 (*Advanced Passive Plant*) américain, deux versions optimisées de réacteurs à eau légère actuels, tant au niveau de l'efficacité que de la sûreté. Les premiers E.P.R. sont en construction sur les sites finlandais d'Olkiluoto et français de Flamanville (Manche) pour une mise en service, respectivement, en 2012 et 2013.

L'actuelle industrie du nucléaire de fission repose presque entièrement sur le seul noyau fissile naturellement disponible sur Terre, l'uranium 235 (noté  $^{235}\text{U}$ ), qui représente 0,72 p. 100 de l'uranium naturel. Le déploiement des réacteurs de générations II et III, qui produisent donc de l'énergie en consommant cette ressource limitée, se trouvera donc bloqué d'ici environ un siècle si l'on intensifie les recours à ce type d'énergie.

L'option proposée est de développer des réacteurs dits de génération IV, dont la particularité essentielle est d'être au moins régénérateurs, c'est-à-dire de produire au moins autant de matière fissile que celle qui est consommée, en transformant des éléments fertiles ( $^{238}\text{U}$  et thorium) en matière fissile. Ces éléments fertiles (hors-texte p. 140) étant naturellement beaucoup plus abondants sur Terre que la matière fissile



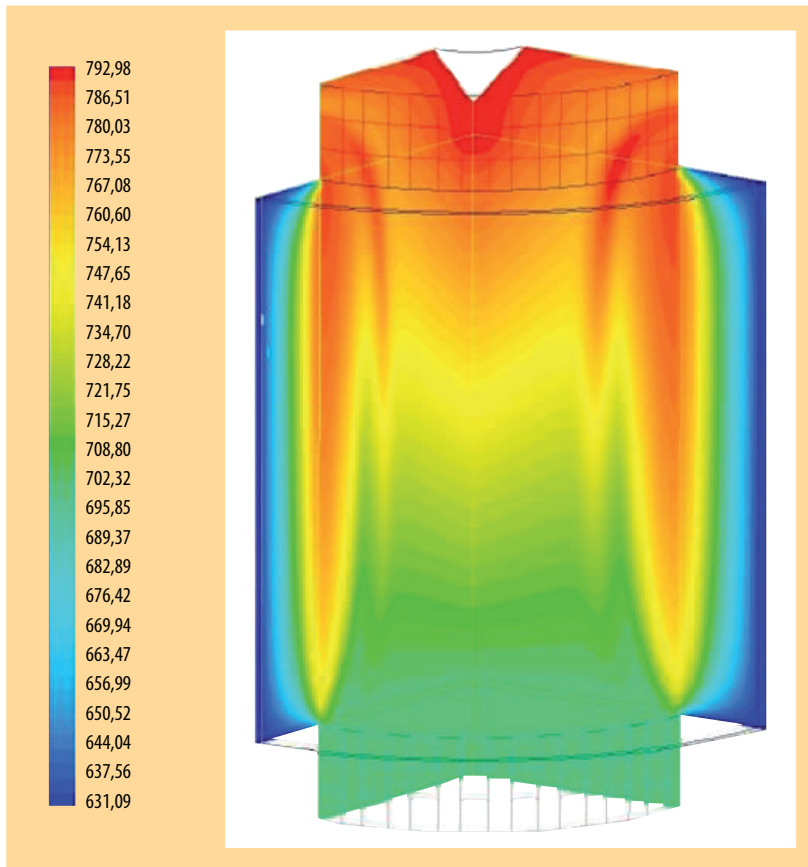
## NUCLÉAIRE : LA GÉNÉRATION IV

Le Forum international génération IV (*Generation IV International Forum* ou G.I.F.) a retenu six concepts de réacteurs les plus prometteurs pour la phase de recherche-développement de nouveaux générateurs. Ce sont : le réacteur à neutrons rapides à caloporteur hélium (*Gas-cooled Fast Reactor* ou G.F.R.) ; le réacteur à neutrons rapides à caloporteur en alliage de plomb (*Lead-cooled Fast Reactor* ou L.F.R.) ; le réacteur à sels fondus (*Molten Salt*

*Reactor* ou M.S.R.) ; le réacteur à eau supercritique ; le réacteur à neutrons rapides à caloporteur sodium (*Sodium-cooled Fast Reactor* ou S.F.R.) ; le réacteur à très haute température (1 000 °C/1 200 °C), refroidi à l'hélium, dédié à la production d'hydrogène ou à la cogénération hydrogène/électricité (*Very High Temperature Reactor* ou V.H.T.R.).

Cet éventail de concepts permet de pouvoir identifier les systèmes présentant des avancées technologiques significatives selon les critères du G.I.F. pour permettre des recouvrements quant aux capacités de ces systèmes, tous n'étant pas destinés à terme à être viables ou à atteindre les performances attendues, voire à présenter un attrait commercial pour être déployés.

La progression des activités de recherche-développement pour chacun de ces systèmes se compose, dans les années à venir, de plusieurs phases : une phase de cadrage et sélection de la version du concept ; une phase de viabilité, dont l'objectif est de répondre aux questions de faisabilité ; une phase de performances correspondant au développement et à l'optimisation des sous-systèmes jusqu'à l'obtention d'un concept mature et suffisamment attractif d'un point de vue industriel ; et enfin une phase de démonstration grandeur nature de la technologie. Si cette dernière est couronnée de succès, le système concerné pourra être commercialisable et passer dans le domaine industriel.



2. Évaluation de la température (en °C) du sel combustible qui circule du bas vers le haut dans le cœur du réacteur. Injecté en bas du réacteur, le sel s'échauffe lors de son mouvement ascendant du fait des réactions de fission.

(par exemple, l'uranium naturel contient 99,27 p. 100 d'<sup>238</sup>U), de tels systèmes permettent d'envisager une production d'énergie nucléaire de fission massive durant plus d'un millénaire.

Les objectifs visés pour ces systèmes de génération IV, de même que le choix des technologies clés pour les atteindre, font l'objet de nombreux échanges internationaux, notamment dans le cadre du Forum international génération IV. Ce dernier a permis d'établir la liste des critères attendus pour ces nouveaux réacteurs (sûreté optimale, économie des ressources, minimisation de la production de déchets, non-prolifération, déploiement), ce qui a abouti en 2002 à retenir six systèmes candidats (hors-texte ci-contre), à étudier comme réacteurs du futur. C'est le réacteur à neutrons rapides caloportés au sodium, similaire au réacteur français Superphénix, qui est le plus étudié de par le monde. Il présente toutefois deux difficultés majeures pour une exploitation industrielle à grande échelle : un coefficient de vide positif, ce qui rend le système potentiellement instable, et la présence d'un matériau hautement inflammable (le sodium) dans le cœur.

## → RÉACTEURS À SELS FONDUS EN CYCLE DU COMBUSTIBLE THORIUM

Les réacteurs à sels fondus (R.S.F.), sur lesquels des recherches sont notamment menées au sein du laboratoire de physique subatomique et de cosmologie (L.P.S.C.)

de Grenoble, constituent une alternative aux réacteurs à neutrons rapides caloportés au sodium. Ils ont pour principale caractéristique d'utiliser un combustible sous forme liquide, un sel fluorure, celui-ci jouant aussi le rôle de caloporteur.

Les études historiques réalisés par le Oak-Ridge National Laboratory (Tennessee, États-Unis) dans les années 1960 sur les réacteurs à sels fondus et, en particulier, le projet nommé Molten Salt Breeder Reactor (M.S.B.R.), d'une puissance de 1 GW électrique, ont servi de base de travail pour le L.P.S.C. Ce dernier a analysé le M.S.B.R. et mis en évidence ses limites, tant du point de vue de sa trop grande complexité, qui le rendait irréalisable, que de son manque de sûreté intrinsèque. À partir de là, l'objectif a été de définir un concept novateur, satisfaisant tous les critères de la génération IV sans présenter d'inconvénient majeur identifié.

Ce nouveau concept de réacteur – fondé sur le cycle du combustible thorium et uranium 233, et sur un spectre neutronique rapide – a été nommé Thorium Molten Salt Reactor Non Moderated (T.M.S.R.-N.M.). D'une puissance de 2 500 MWth, il fonctionne à une température comprise entre 650 °C et 800 °C, ce qui correspond à un rendement thermodynamique de 40 à 50 p.100. Le cœur du réacteur est un simple canal de diamètre interne égal à sa hauteur, dans lequel les réactions de fission ont lieu dans le sel fluorure en mouvement ascendant (fig. 1 et 2). Deux tiers du sel combustible sont localisés dans le cœur, le tiers restant circulant hors du cœur, dans les tuyauteries, les pompes et les échangeurs de chaleur. Le sel combustible effectue un tour de circulation complet en quelques secondes.

Le réacteur proprement dit est constitué de l'ensemble des parties du système contenant le sel combustible, soit le circuit primaire au complet composé du cœur, des tuyauteries, des pompes et des échangeurs de chaleur. Il représente la première barrière de confinement du combustible dans le principe de défense en profondeur. L'ensemble du réacteur est contenu dans une cuve qui matérialise la seconde barrière de confinement. Des réflecteurs axiaux et radiaux en acier, composés d'un alliage spécial à base de nickel en cours d'optimisation au C.N.R.S., entourent l'ensemble du cœur afin de protéger les structures externes des effets d'irradiation causés par les neutrons sortant du réacteur. Le réflecteur radial contient en plus un second sel, dit sel fertile car contenant du thorium, afin d'améliorer la production de matière fissile en capturant de manière utile les neutrons s'échappant du cœur.

Comme pour tout réacteur nucléaire de génération IV, une unité de retraitement est indispensable pour la gestion et le recyclage du combustible. Dans le cas du T.M.S.R.-N.M., celle-ci est associée au réacteur sur le site, ce qui évite des transports de matières radioactives. Par ailleurs, le combustible étant liquide, il est possible, au cours du fonctionnement du réacteur, de ponctionner chaque jour un petit volume de sel pour le retraiter puis le réinjecter. Toutefois, la configuration du T.M.S.R.-N.M. est telle que, bien qu'indispensable pour le fonctionnement à long terme du réacteur, ce retraitement n'a pas d'influence notable sur son fonctionnement à court terme. Ainsi, un dysfonctionnement de l'unité de retraitement entraînant son arrêt sur plusieurs semaines, n'imposerait pas forcément un arrêt du réacteur lui-même.

## → LES RECHERCHES ACTUELLES

Diverses études par simulation ont permis, ces dernières années, d'optimiser la configuration du T.M.S.R.-N.M., en prenant en compte les paramètres importants du réacteur :

– la composition du sel combustible qui contient essentiellement du fluorure de lithium (LiF, 77,5 p.100) et du fluorure de thorium (ThF<sub>4</sub>, 20 p.100), ainsi qu'un composant fissile comme le fluorure d'uranium (UF<sub>3</sub>, 2,5 p.100). La proportion relative entre le lithium et les noyaux lourds (thorium et uranium, ainsi que d'autres actinides – Pa,

Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf – formés au cours du fonctionnement du réacteur) influence le spectre neutronique et les propriétés physico-chimiques du sel ;

- les performances du retraitement du combustible associées au réacteur qui influent sur les capacités de production de matière fissile ;
- les coefficients de sûreté qui, lorsqu'ils sont négatifs, assure un comportement stable du réacteur même en cas de dysfonctionnement grave ;
- les capacités de régénération – c'est-à-dire la quantité de matière fissile produite ramenée à celle qui est consommée – et donc de déploiement de la filière.

Ces simulations du comportement d'un cœur nucléaire et du suivi de son évolution sont basées sur le couplage entre un code de transport de neutrons et un code d'évolution du combustible développé au L.P.S.C. et des matériaux présents dans le réacteur. Ces travaux s'effectuent en interactions étroites avec des spécialistes, tant nationaux (C.N.R.S., universités, C.E.A., E.D.F.) qu'internationaux (Europe, États-Unis, Russie, Japon), pour ce qui est des matériaux de structure du réacteur, de la pyrochimie pour les capacités de retraitement du combustible et de la thermohydraulique pour la circulation du sel combustible. Le C.N.R.S. a ainsi mis en place un Programme commun de recherche sur les R.S.F. (P.C.R.-R.S.F.) qui regroupe ses départements de physique nucléaire, de chimie et de sciences de l'ingénieur. Ce programme permet de coordonner les études neutroniques avec celles qui visent à démontrer la faisabilité du retraitement envisagé, et en particulier les étapes clés que sont l'extraction des produits de fission non solubles dans le sel par bullage d'hélium dans le cœur, la fluoration des uraniums, neptunium et plutonium pour les retirer du sel avant son retraitement et la pyrochimie qui permet l'extraction des produits de fission solubles dans le sel.

### → COMMENT DÉPLOYER À GRANDE ÉCHELLE CE TYPE DE RÉACTEUR ?

L'<sup>233</sup>U utilisé comme matière fissile dans les T.M.S.R.-N.M. dès son démarrage n'existant pas à l'état naturel sur Terre, des études sont également menées afin d'identifier les meilleures solutions qui puissent permettre de fournir la première charge (cf. hors-texte p. 140) en matière fissile pour ces réacteurs. Un démarrage direct à l'<sup>235</sup>U est possible mais, pour des raisons de non-prolifération, il faut limiter l'enrichissement en <sup>235</sup>U autour de 20 p. 100 à 30 p. 100. Dans ces conditions (70 p. 100 d'<sup>238</sup>U et 30 p. 100 d'<sup>235</sup>U), la présence d'<sup>238</sup>U accompagnant l'<sup>235</sup>U provoque la formation de transuraniens en quantités pouvant être incompatibles avec leur solubilité dans le sel et pouvant provoquer une précipitation incontrôlée de ces transuraniens. La souplesse de fonctionnement du T.M.S.R.-N.M. permet toutefois de trouver des compositions de démarrage évitant cet écueil. Une autre solution consiste à produire l'<sup>233</sup>U dans les réacteurs de génération II et III (R.E.P., Candu) ou futurs (réacteurs à neutrons rapides R.N.R.), ou encore d'utiliser directement le plutonium et les actinides mineurs produits par ces mêmes réacteurs actuels. Cette dernière possibilité présente des avantages certains ; en effet, cette voie d'utilisation directe des déchets nucléaires des centrales actuelles pour démarrer les T.M.S.R.-N.M. permet à la fois de minimiser la production



### BIBLIOGRAPHIE

C. W. Forsberg et al., « Liquid Salt Applications and Molten Salt Reactors », in *Revue générale du nucléaire*, n° 4, pp. 63-71, 2007 / D. Heuer, E. Merle-Lucotte et L. Mathieu, « Concept de réacteurs à sels fondus en cycle thorium sans modérateur », in *Revue générale du nucléaire*, n° 5, pp. 92-99, 2006 / E. Merle-Lucotte et al., « Introduction to the Physics of Molten Salt Reactor », in *Materials Issues for Generation IV Systems, NATO Science for Peace and Security Series - B*, Éditions Springer, pp. 501-521, 2008.



### SITES INTERNET

<http://lpsc.in2p3.fr/gpr/gpr/french/index.htm> (Groupe Physique des Réacteurs)  
<http://www.iea.org/> (Agence Internationale de l'Énergie)  
<http://www.gen-4.org/> (Forum International Génération 4)

de déchets à vie longue des filières existantes, de développer largement la production d'énergie nucléaire et de clore le cycle actuel des réacteurs à eau.

### → VERS UN DÉMONSTRATEUR

Le programme de recherche en cours illustre le potentiel important de développement de ce concept de T.M.S.R.-N.M., dont la simplicité, la robustesse et l'adaptabilité ont mené à sa sélection au niveau international pour des études poussées, vers la définition d'un démonstrateur. Celui-ci permettra, d'ici à 2020, de concrétiser la position prometteuse que peuvent avoir les réacteurs à sels fondus comme réacteurs de quatrième génération, pour produire une grande part de l'énergie nucléaire dont le monde aura sans doute besoin dans un futur proche ■

- ▶ *La Science au présent 2000* « Quelle énergie pour les années 2000 ? », p. 261.
- ▶ *La Science au présent 2004* « Les Réacteurs nucléaires hybrides », p. 109.



# Paléoclimatologie

## QUAND LA TERRE ÉTAIT RECOUVERTE DE GLACE

→ *On sait qu'au cours du Néoprotérozoïque, il y a de 800 à 600 millions d'années (Ma), les glaces ont recouvert la Terre jusqu'à des latitudes au moins très proches de l'équateur. Dans la formation Elatina, dans le sud de l'Australie, on trouve, à proximité des traces de la glaciation, des dépôts (turbidites) témoignant de courants de marée dans des eaux peu profondes. Le cadre géologique et le champ magnétique fossile situent ces dépôts très proches de l'équateur de cette période. En 1989, le chercheur américain Joe Kirschvink, spécialiste du paléomagnétisme, en a tiré l'idée d'une couverture quasi totale du globe par les glaces. Cette hypothèse, sans être unanimement acceptée, a stimulé une très grande activité de recherche d'autres indices et d'explications possibles. On admet aujourd'hui, que la Terre a existé dans un état de glacière totale, souvent appelé « la Terre en boule de neige » (Snowball Earth) et le même phénomène semble s'être produit pendant une autre période plus ancienne : le Paléoprotérozoïque (2 300 Ma). Comment comprendre cet état et quels ont été les implications pour l'évolution de la vie ?*

**Robert Kandel**  
directeur de recherche  
émérite du C.N.R.S.,  
Laboratoire de  
météorologie dynamique,  
École polytechnique,  
Palaiseau

### → LE PARADOXE DU SOLEIL FAIBLE

Nous savons que le Soleil devait être nettement moins lumineux il y a quatre milliards d'années, et si la température de la surface de la Terre était au-dessous de 0 °C, cela aurait conduit à une planète couverte de glace. Lorsqu'elles couvrent de grandes étendues, la glace et la neige, réfléchissant fortement la lumière visible, contrôlent le bilan radiatif planétaire, limitant l'absorption et la conversion en chaleur du rayonnement solaire. Mais