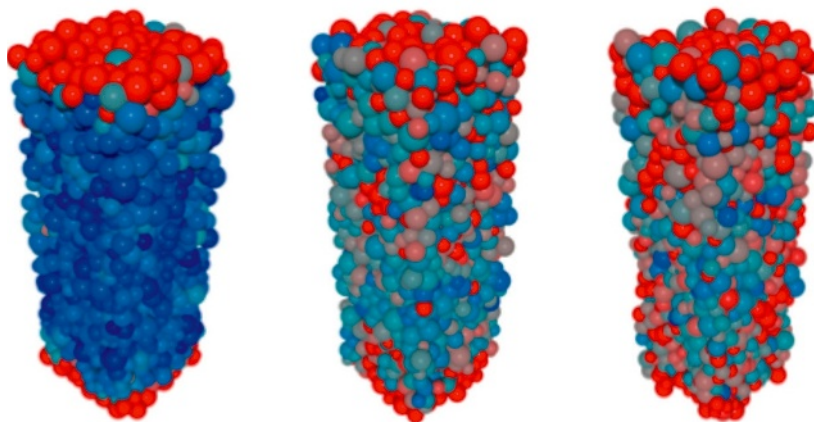


Cette difficulté laissait peu d'espoir pour l'approche numérique, mais la situation a radicalement changé en 2016. À l'université de Montpellier, nous avons mis au point un nouvel algorithme de type Monte-Carlo, c'est-à-dire qui repose sur un certain aléa lors de son exécution. Cet algorithme comble l'énorme écart entre simulations et expériences et permet d'étudier numériquement des verres modèles dont la structure est directement comparable aux verres expérimentaux. Mieux, en optimisant encore cet algorithme nous avons été capables, pour certains modèles de verres, de produire des verres considérablement plus stables et plus denses que des verres préparés expérimentalement, le gain en temps de calcul pouvant être supérieur à douze ordres de grandeur (voire quarante ordres de grandeur pour des films en deux dimensions!). Ces verres préparés *in silico* sont donc directement comparables aux films ultrastables obtenus par le groupe de Mark Ediger, et nous permettent d'approcher dans des études numériques bien contrôlées le verre idéal tant recherché. Cette avancée importante nous permet en particulier de tester de façon détaillée la théorie du champ moyen.

VERRES NUMÉRIQUES QUASI IDÉAUX

Depuis 2016, de nombreux travaux numériques ont permis d'explorer le comportement physique des liquides à des températures qui n'avaient jamais été étudiées auparavant. En particulier, plusieurs études semblent désormais confirmer assez directement la validité de la théorie du champ moyen pour décrire des verres modèles en trois dimensions. Pour ces systèmes, on démontre en refroidissant des liquides au plus proche de la transition vitreuse idéale que toutes les caractéristiques thermodynamiques prédites par la théorie sont bien observées. Nos simulations suggèrent en particulier que l'entropie configurationnelle s'annule à une température de transition finie vers la phase du verre idéal (*voir la figure page 69*). Cette transition présente les mêmes caractéristiques qu'une transition de phase du premier ordre (comme la transition liquide/solide pour l'eau à 0 °C).

Ces récents développements numériques et expérimentaux jettent une lumière nouvelle sur l'ensemble des propriétés physiques du verre. On peut désormais varier à loisir la qualité du verre préparé pour en étudier ensuite les propriétés macroscopiques. On peut alors se demander si les verres ultrastables, qui se rapprochent au plus près du verre idéal, ont des propriétés différentes des verres ordinaires. La réponse est oui. Nous comprenons désormais que les propriétés



thermiques, thermodynamiques et mécaniques du verre s'expliquent par l'existence d'une petite population d'excitations localisées dans le verre. L'existence de tels «défauts» est pourtant difficile à concevoir puisque la structure microscopique du verre est parfaitement homogène et désordonnée. Il reste difficile de définir les outils numériques ou mathématiques adéquats pour les identifier de manière simple et générique. Pourtant, la simulation numérique montre par exemple que lorsqu'on déforme lentement un verre, la déformation plastique est bel et bien localisée dans quelques endroits rares de l'échantillon, dont le nombre semble diminuer dramatiquement lorsqu'on s'approche du verre idéal. Il est donc tentant de postuler que le verre idéal, tel que prédit par la théorie du champ moyen, serait bien un matériau «parfaitement désordonné» ne comportant strictement aucun défaut : le désordre parfait!

En 2014, l'équipe de Frances Hellman, de l'université de Californie à Berkeley, a démontré que les excitations à l'origine des effets dissipatifs dans le verre à très basse température seraient beaucoup moins nombreuses dans les verres ultrastables. Des résultats similaires ont été obtenus par Miguel Ramos et ses collaborateurs. Notre étude numérique publiée en 2020 (*voir l'encadré page 70*) soutient ces résultats expérimentaux, suggérant que les effets dissipatifs seraient quasiment absents dans le verre idéal. L'équipe de Berkeley travaille aujourd'hui au développement de revêtements vitreux ultrastables pour les futurs miroirs de l'interféromètre *Ligo*. De tels verres à la dissipation fortement réduite pourraient aussi résoudre les problèmes de la cohérence des qubits dans les futurs ordinateurs quantiques. Même si la quête du verre idéal n'est pas encore arrivée à son terme, elle laisse déjà entrevoir de nombreuses applications pour d'autres secteurs telles que la recherche de pointe ou les télécommunications. ■

Grâce à une technique de fabrication par dépôt de molécules en phase gazeuse, les verres ultrastables présentent les caractéristiques, notamment la densité, de verres refroidis très lentement.

Ludovic Berthier et ses collègues ont développé une simulation numérique fondée sur un algorithme de type Monte-Carlo qui échange la position de différentes molécules dans le matériau. Ce processus aléatoire permet d'explorer rapidement différentes configurations et les énergies associées. Les chercheurs ont ainsi montré que lors de la formation du verre ultrastable, les particules en surface diffusent plus facilement que celles en volume, ce qui permet d'atteindre un état d'équilibre stable (*ci-dessus trois simulations réalisées à des températures différentes – la plus basse à gauche, la plus élevée à droite – et où plus une bille est rouge, plus elle est mobile*).

Gaïa

Enquête sur une révolution silencieuse

Proposée dans les années 1970, l'hypothèse Gaïa, qui compare la Terre à un organisme vivant, irrigue toujours, silencieusement, les savoirs et les politiques actuelles concernant la Terre. Pourquoi une telle discrétion ? Retour sur un concept controversé.



Cette photographie de la Terre, prise en 1972 lors de la mission *Apollo 17*, a marqué les esprits en soulignant sa vulnérabilité et a renforcé l'idée d'étudier la planète comme un tout.

L'ESSENTIEL

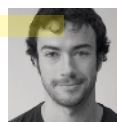
> Au début des années 1970, le chimiste britannique James Lovelock et la microbiologiste américaine Lynn Margulis ont proposé une nouvelle manière de penser et d'étudier la Terre, prenant en compte l'influence du vivant sur l'environnement global.

> À la suite du récit élaboré par des biologistes, cette « hypothèse Gaïa » a souvent été présentée comme une pseudoscience New Age.

> Pourtant, elle a connu une réception extrêmement riche en sciences de la Terre et a fourni une nouvelle conception de la planète qui a transformé les savoirs et politiques environnementales contemporaines.

> Pourquoi, alors, le mot « Gaïa » semble-t-il avoir disparu de ces sciences après les années 1980 ? La réponse est à chercher dans la biographie même de James Lovelock.

L'AUTEUR



SÉBASTIEN DUTREUIL
historien et philosophe des sciences, chargé de recherche au CNRS, directeur adjoint du centre Gilles-Gaston-Granger, à Aix-Marseille université

La conférence sur le climat qui s'est tenue à Copenhague en 2009 a marqué un tournant dans l'histoire de la politique climatique. Même si elle a pu paraître décevante, elle a entériné l'objectif visant à maintenir le réchauffement climatique par rapport à la période préindustrielle en dessous de 2°C. Pour la première fois, une limite chiffrée en température était donnée dans le cadre d'un accord international. Mais d'où venait-elle ? Apparue dans les années 1970, elle n'a été mise en avant comme « seuil dangereux à ne pas franchir » que dans les années 1990, notamment par le WBGU, le Conseil allemand sur le changement global. Le climatologue allemand Hans Joachim Schellnhuber, membre de cette institution, a joué un rôle clé dans cette mise en avant. Conseiller d'Angela Merkel, alors ministre de l'Environnement du gouvernement allemand, il l'a convaincue de l'importance de cette limite. L'Allemagne a ainsi été le premier pays à adopter cet objectif, en 1995, suivie par l'Europe en 1996... et le Monde en 2009 à Copenhague, avec la suite que l'on connaît.

Parmi les arguments que Hans Joachim Schellnhuber a avancés pour justifier cet objectif, il en est un particulièrement intrigant. Le climatologue comparait la Terre à un organisme : 2°C semblent peu si l'on compare la température entre l'intérieur et l'extérieur d'une pièce, mais c'est énorme si l'on pense cette augmentation comme la fièvre d'un organisme qui pourrait déstabiliser les « organes » de la Terre. Cette comparaison de la Terre à un organisme, Hans Joachim Schellnhuber l'emprunte directement à l'hypothèse Gaïa – une conception de la Terre proposée dans les années 1970 par deux chercheurs, James Lovelock et Lynn Margulis – sans toutefois toujours la citer explicitement. Gaïa, la personnification grecque de la Terre mère ? Est-ce bien sérieux ? Parle-t-on bien de Gaïa, l'hypothèse controversée ayant donné naissance à une pseudoscience New Age ? Oui, c'est bien elle. Mais en menant l'enquête sur l'histoire de ce concept

et les différents récits qui en ont été faits, on comprend mieux pourquoi... Et on s'aperçoit que Gaïa a profondément irrigué les savoirs et politiques contemporaines de la Terre. En fait, Gaïa nous est devenue si familière et a été tellement intégrée aux discours scientifiques et aux conceptions philosophiques et politiques de la Terre que nous ne la repérons même plus lorsque son nom n'est pas prononcé.

LES DIFFÉRENTS RÉCITS SUR GAÏA

Plusieurs récits ont été élaborés sur Gaïa. James Lovelock est l'auteur du premier. Né en 1919 et aujourd'hui âgé de 102 ans, ce chercheur britannique raconte dans son autobiographie qu'il a quitté une carrière académique d'ingénieur-chimiste au début des années 1960 pour s'établir comme « scientifique indépendant ». Il a d'abord travaillé comme consultant pour la Nasa, où il a réfléchi à un critère pour détecter la vie sur d'autres planètes. Il a alors compris l'importance de l'influence qu'ont les organismes vivants sur l'atmosphère. La prise en compte de ce fait l'a conduit à l'hypothèse que la vie pourrait réguler l'environnement global, hypothèse popularisée par la comparaison de Gaïa à un organisme qui régule sa température interne. Gaïa l'entité était née : elle évoquait désormais l'ensemble des organismes vivants et l'environnement avec lequel ils interagissent. James Lovelock raconte ensuite qu'à partir du milieu des années 1960, il s'est retiré à la campagne dans le sud-ouest de l'Angleterre, a construit un laboratoire dans son garage et a écrit ses livres sur Gaïa pour proposer une réflexion sur la vie, la Terre et la nature. À partir des années 2000, il affirme que Gaïa est à l'origine d'une reconfiguration importante des sciences de la Terre : la constitution des sciences du système Terre.

Un second récit a façonné l'histoire de Gaïa de manière plus importante encore que celui de James Lovelock. Au début des années 1980, deux biologistes de l'évolution, le Britannique Richard Dawkins et l'Américain Ford Doolittle, ont critiqué l'hypothèse Gaïa. Ils voyaient