

N° 1210
JUILLET 2018

Ressources,
climat,
pollution...

LA FACE CACHÉE DES Océans

Le nouvel enjeu
planétaire



FORTNITE

Le jeu qui monte
au cerveau



**STATION
ORBITALE LUNAIRE**
Enquête sur
un projet fou

MONDADORI FRANCE

D: 6,90 € - BEL: 4,80 € - ESP: 4,90 € - GR: 4,90 € - DOM S: 4,90 € - DOM A: 6,90 € - ITA: 4,90 € - LUX: 4,80 € - PORT CONT: 4,80 €
CAN: 6,75 \$ CAN - MAR: 50 DH - TOM S: 750 CFP - TOM A: 1 400 CFP - TUN: 8,50 FS - TUN: 9 DTU

M 02578 - 1210 - F: 4,50 € - RD




500 ans, 10 000 ans, 100 000 ans...

5 projets qui défient le temps

Qu'il s'agisse de confiner des déchets radioactifs ou d'archiver des données, plusieurs projets font le pari de s'inscrire dans le temps long, voire très long. Mais avec quelles garanties ? Comment les ingénieurs défient-ils le temps ? À partir de cinq cas concrets, **Emmanuel Monnier** a creusé la question. Et tenté d'établir certaines règles valant éternité.





Un million de semences sont congelées au cœur de cette arche de Noé enfouie dans le permafrost.

Stocker des semences dans le sous-sol gelé afin que, même dans plusieurs siècles, les générations futures puissent encore les faire germer en cas de bouleversement écologique. L'idée semble bonne. *"Le permafrost garantit que les graines resteront congelées même en cas de défaillance du système de réfrigération"*, souligne le biologiste Åsmund Asdal, qui

Des graines conservées 500 ans ?

coordonne ce projet pour l'État norvégien. Des semences ont donc été sélectionnées parmi celles qui peuvent germer même après dessiccation et congélation, comme les céréales. Depuis 2007, elles sont confinées dans un blockhaus dont les chambres fortes sont maintenue à -18°C dans un air aride, sur l'île du Spitzberg, au nord-est du Groenland.

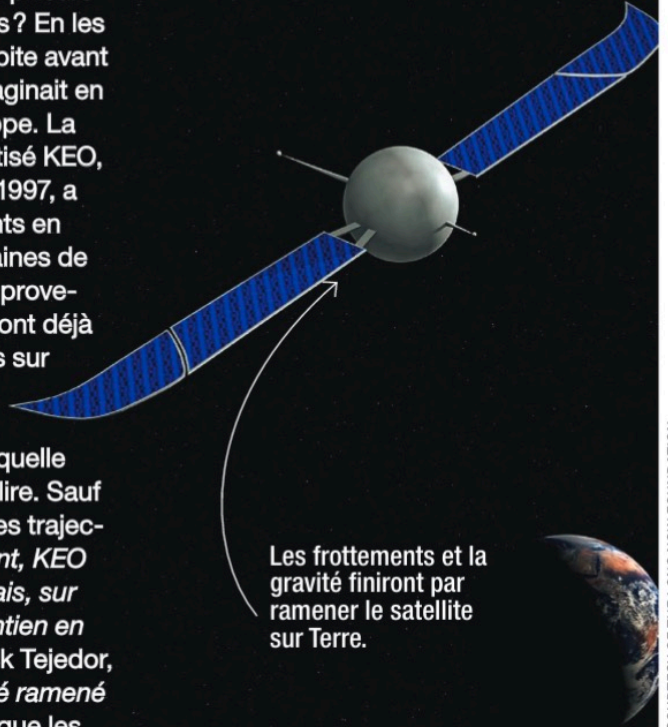
Sauf que dix ans après sa construction, cette arche de Noé montre que construire pour le temps long reste un défi : les températures exceptionnellement douces de l'été dernier ont commencé à faire fondre le sol gelé, provoquant des infiltrations d'eau. Et si le permafrost disparaissait ? *"Rien n'est encore prévu"*, avoue Åsmund Asdal...

Comment transmettre nos souvenirs et nos pensées à nos lointains descendants? Comment les protéger des séismes ou des pilliers de trésors durant des milliers d'années? En les envoyant tourner tranquillement en orbite avant de les faire redescendre sur Terre, imaginait en 1995 l'artiste-peintre Jean-Marc Philippe. La faisabilité technique de ce projet, baptisé KEO, qui a reçu le soutien de l'Unesco dès 1997, a mobilisé des bénévoles et des étudiants en

aéronautique. Des centaines de milliers de témoignages provenant de toute la planète ont déjà été recueillis, enregistrés sur des DVD résistant aux radiations, et enfer-

més dans une sphère de 80 cm sur laquelle sont gravées les instructions pour les lire. Sauf que pour un temps si long, le calcul des trajectoires orbitales est un défi. *"Initialement, KEO était prévu pour orbiter 50 000 ans, mais, sur cette durée, les incertitudes d'un maintien en orbite sont trop grandes, confie Patrick Tejedor, expert en aéronautique. L'objectif a été ramené à quelques dizaines de siècles."* Pour que les générations futures puissent partager les espoirs et préoccupations de leurs aïeux, reste à trouver un financement (de l'ordre de 10 à 20 millions d'euros) et une place sur un lanceur.

Un satellite qui reviendra dans 5 000 ans ?

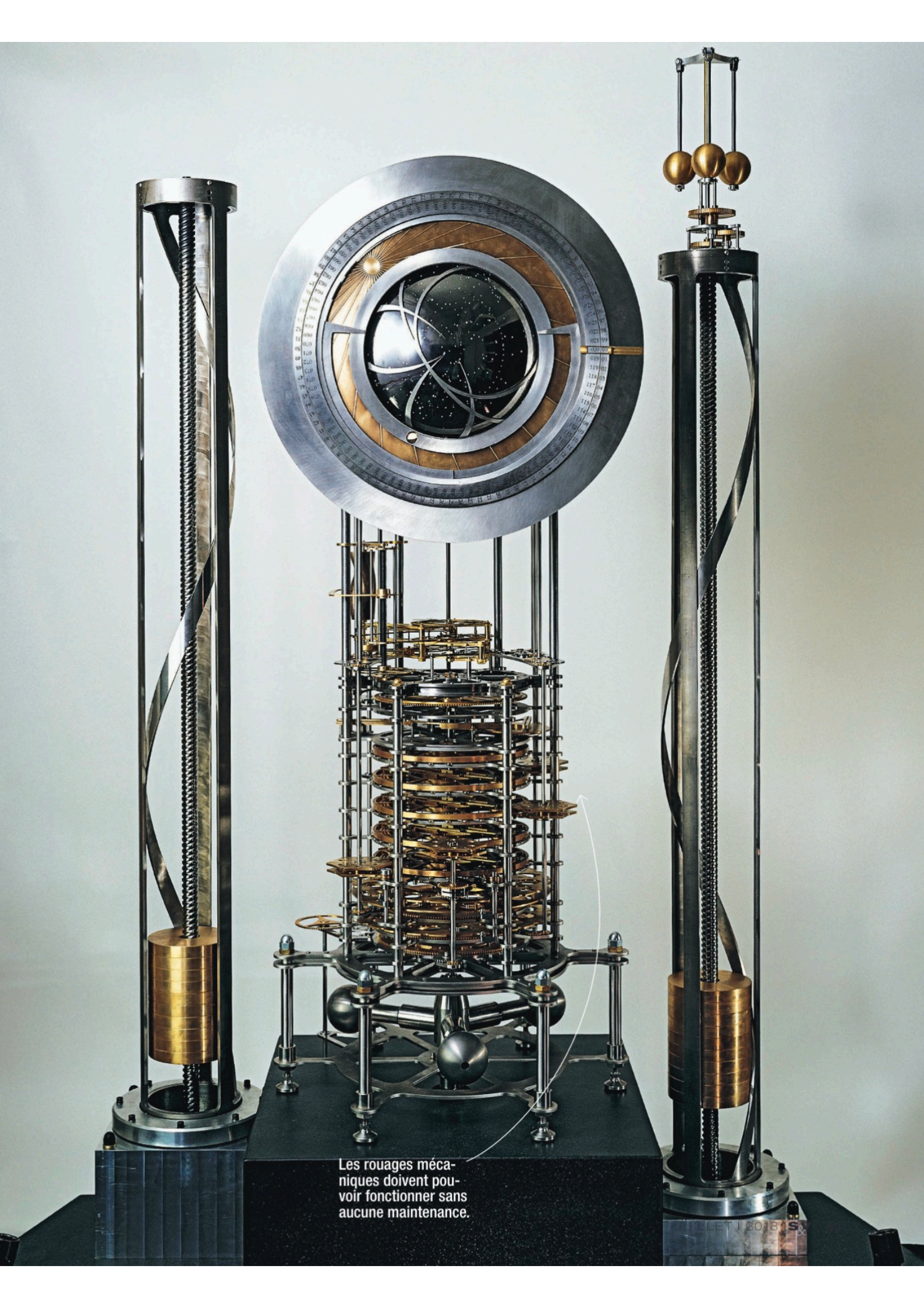


Les frottements et la gravité finiront par ramener le satellite sur Terre.


PROGRAMME KEO - R. HORN COURTESY OF THE LONG NOW FOUNDATION

Le projet est avant tout symbolique: avec son horloge monumentale de 150 m de hauteur censée tourner pendant des dizaines de siècles, l'ingénieur américain Danny Hillis espère sensibiliser les nouvelles générations au long terme. Le défi d'ingénierie, cela dit, est bien réel. Première contrainte: le fonctionnement doit être simple, pour faciliter l'entretien – car les savoirs d'aujourd'hui seront peut-être perdus. D'où le choix d'un système entièrement mécanique. Ce qui implique d'opter pour des matériaux ultrarésistants (du titane pour le balancier, par exemple), de limiter les frottements qui usent les pièces et d'éviter les risques de grippage. Le dispositif sera enfoui dans une galerie au cœur du désert du Texas, afin que l'air sec et la stabilité géologique le conservent au mieux. Il sera alimenté par la différence de température jour/nuit, qui déformera un matériau à mémoire de forme – à midi, la lumière chaude qui pénétrera par une étroite cheminée ajustera la course du pendule et synchronisera l'horloge. Sachant que pour faire apparaître l'heure, il faudra remonter une roue, ce qui fournira aussi un peu d'énergie au cadran de l'horloge. Après un premier prototype mis en marche en 1999, le projet a repris grâce au PDG d'Amazon, Jeff Bezos, qui soutient financièrement sa construction (coût total estimé: 42 millions de dollars!). Est-ce bien réaliste? L'avenir (lointain) le dira...

Une horloge qui battra le temps dans 10 000 ans ?



Les rouages mécaniques doivent pouvoir fonctionner sans aucune maintenance.



À 500 m sous terre, trois couches successives de protection isoleront les déchets nucléaires.

Des données archivées pour **1 000 000 d'années ?**

C'est l'archivage numérique absolu, garanti 1 million d'années... voire plusieurs milliards! Quasiment l'éternité... Et c'est sur la chimie que repose cette inimaginable promesse, lancée par la fondation américaine Arch Mission. *"Le support que nous avons choisi est de l'oxyde de silicium pur à l'état vitreux, qui se forme quand du silicium est exposé à de l'oxygène,* confie Peter Kazansky, à l'université de Southampton (R.-U.).

Il se crée alors des liaisons covalentes qui ont une très grande stabilité chimique, en théorie sur des milliards d'années. Notre avancée majeure a été de réaliser une haute capacité de stockage sur ce support exceptionnel." Un laser femtoseconde permet en effet de graver dans ce matériau des structures nanométriques, dont le motif modifie la polarisation et l'intensité de la lumière réfléchie. Ce qui ajoute deux dimensions supplémentaires pour le stockage par rapport aux DVD classiques. De quoi sauvegarder jusqu'à 360 téraoctets de données sur un disque de 12 cm de diamètre, chaque disque contenant aussi les instructions de décodage.

Des exemplaires devraient être envoyés sur la Lune et sur Mars. Un premier est déjà parti, en février, à bord du cabriolet Tesla lancé dans l'espace par une fusée Space X, avec la trilogie *Fondation* d'Asimov gravée dedans, qui se déroule... dans 22 000 ans.

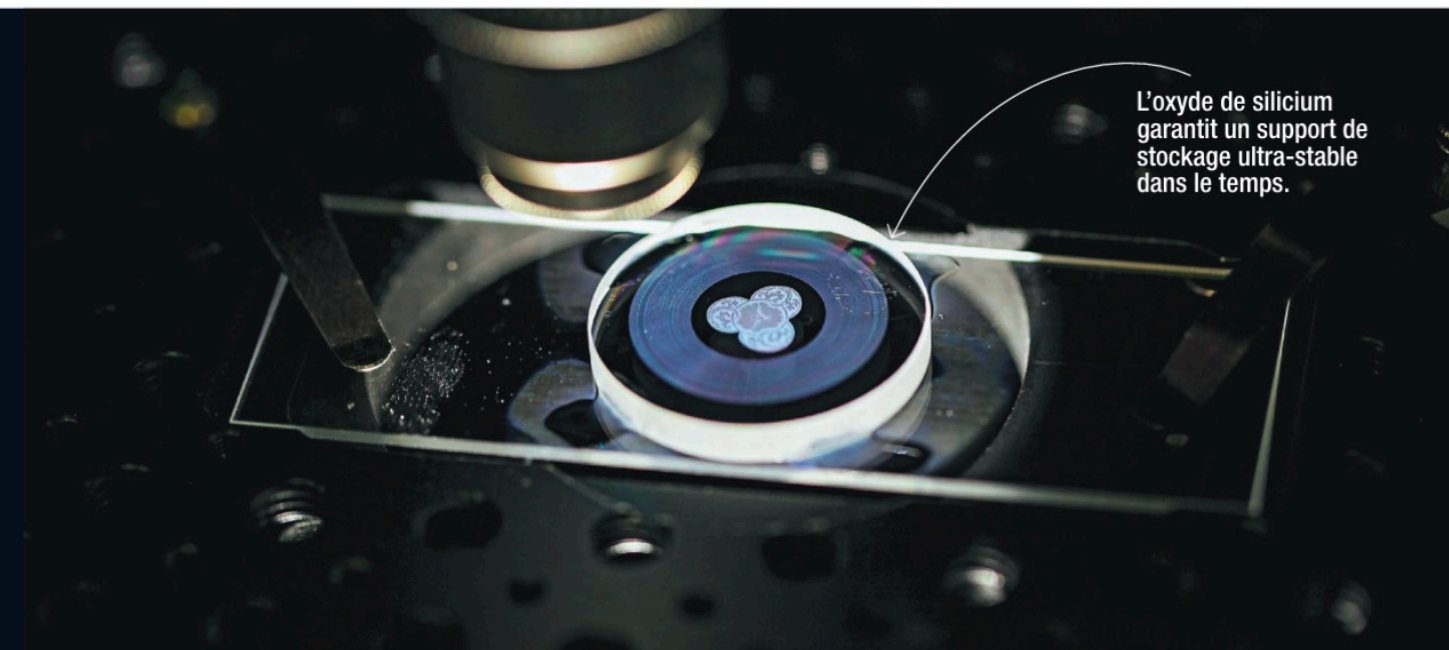


Comment tenir une promesse qui court sur des dizaines de milliers d'années? C'est le défi que doit relever en France l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra), qui s'est engagée à sécuriser ces rebuts aussi longtemps qu'ils resteront dangereux. Le site choisi est celui de Bure (Meuse), dans des alvéoles creusées à 500 m sous terre. Le stockage est conçu autour de trois barrières successives: d'abord, une enceinte en métal pour le colis contenant les déchets, censée se dégrader lentement au fil des

Des déchets enfouis pendant 100 000 ans ?

siècles; puis une alvéole de béton, censée empêcher durant plusieurs siècles les radionucléides dissous dans l'eau de s'infiltrer dans la roche; enfin une couche d'argile de

150 m, censée étaler pendant plus d'une centaine de milliers d'années les remontées de radionucléides. Depuis des décennies, études et simulations s'enchaînent pour convaincre de la sûreté de cette solution. Sauf que, comme le souligne Leny Patinaux, chercheur à l'École des ponts, "lorsqu'on met des déchets nucléaires vitrifiés dans des colis en métal qui chauffent, eux-mêmes placés dans du béton, et le béton dans une roche dont on a perturbé les propriétés parce qu'on a creusé dedans, ça devient difficile à simuler". D'autant qu'il faut anticiper les accidents: séismes, hausse du niveau de la mer... "L'Andra montre qu'elle a fait tout ce qui était possible pour garantir cette sûreté. Mais elle reconnaît qu'il n'y a pas de preuve absolue", note le spécialiste. Une sorte d'aveu d'humilité face au temps long.



L'oxyde de silicium garantit un support de stockage ultra-stable dans le temps.

PHOTOPQR/L'EST REPUBLICAIN/MAXPPP - ORC/ UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON

Construire pour durer le plus longtemps possible? Alors qu'on légifère contre l'obsolescence programmée, ce défi évoque une autre époque. Celle des cathédrales, réalisées sur plusieurs siècles, et dont les clochers sont toujours là. Celle des constructions en bois – certaines églises en Norvège s'approchent du millénaire. Celle de ces charpentiers qui, selon un mythe à la vérité aujourd'hui discutée, auraient planté en 1386 les glands des chênes qu'ils avaient coupés pour les poutres du grand Hall du New College d'Oxford, afin de préparer leur remplacement quelques siècles plus tard...

Mais nous, que léguerons-nous à nos lointains descendants? Quels bâtiments, quelles technologies parviendront à traverser les siècles et les millénaires? Qui, de nos jours, vise "l'éternité"? "Aujourd'hui, aucune norme de construction n'adresse le temps long", constate Henri Safa, directeur adjoint de l'Institut international de l'énergie nucléaire, une industrie pourtant habituée à s'inscrire dans la durée.

Preuve, s'il en est, que la question de la durée ne colle guère à notre époque, les travaux uni-

versitaires visant à en étudier les contraintes techniques spécifiques sont extrêmement rares, faute de desseins concrets.

Voilà qui distingue d'autant plus l'originalité des cinq projets présentés dans les pages précédentes : eux ont choisi de prendre l'époque court-termiste à rebours. Relèveront-ils réellement le défi? L'avenir le dira... Car certains ratés (voir encadré) incitent à la modestie. En attendant, tous souscrivent à certaines règles. Des règles aux allures de recette d'éternité.

D'abord, il faut faire simple. "Dans le nucléaire, la robustesse des systèmes de sûreté s'appuie sur la redondance, mais aussi sur l'emploi de circuits très basiques. Entre la conception d'un composant et son usage, il se déroule environ quinze ans. Les technologies paraissent donc dépassées, mais elles sont robustes et éprouvées", confirme Henri Safa.

CHOISIR LE BON LIEU, LES BONS MATÉRIAUX

Construire pour durer, c'est aussi choisir le bon lieu. Par exemple, le permafrost gelé pour conserver des semences, les couches argileuses stables et imperméables pour stocker des déchets hautement radioactifs ou le désert texan pour limiter la corrosion des engrenages.

Autre impératif crucial : sélectionner les bons matériaux. Oui, mais comment simuler le comportement d'une pièce de béton, de métal ou de silice fondue sur des millénaires? "On peut accélérer le temps en modifiant par exemple la température", explique Henri Safa. Car la migration des espèces chimiques suit des lois qui varient en fonction de la température. Chauffer accélère les processus et permet donc de simuler le vieillissement.

Les ingénieurs ont parfois la chance de pouvoir s'appuyer sur des "expériences" en temps réel qui valident leurs modèles. Ainsi, les ingénieurs du nucléaire savent que le verre dans lequel ils emprisonnent leurs déchets favorise à très long terme la formation d'un gel protecteur lorsque l'eau vient à son contact : cet effet est attesté par les archéologues. "Dans l'Antiquité, les Romains transportaient par bateaux le verre qu'ils achetaient aux Phéniciens. Certains ont coulé et ce verre repose donc au fond de la Méditerranée où il a subi l'attaque d'une eau de mer très corrosive car fortement chargée

Et la mémoire? Se souviendra-t-on encore de tous ces projets dans plusieurs siècles? Comment accèdera-t-on à leur contenu?

en sels minéraux. La couche de gel est exactement celle prévue par les modèles, elle a protégé les verres pendant plus de 2 000 ans !” raconte Henri Safa.

Mais, hors de ces rares coups de chance, le long terme reste toujours difficile à embrasser. Comment modéliser toutes les interactions physiques, chimiques, géologiques sur des millénaires ? D’autant qu’il faut ajouter une profusion de scénarios accidentels possibles : un séisme, une élévation du niveau de la mer, voire une simple intrusion involontaire.

Ce qui amène à considérer ce qui est sans doute la plus délicate de toutes les incertitudes sur le temps long : celle de la mémoire. Se souviendra-t-on encore de tous ces projets dans plusieurs siècles ? Comment accèdera-t-on à leur contenu ? Le cas du stockage des déchets nucléaires est ici emblématique. L’Andra insiste : si son stockage peut se passer de toute maintenance humaine durant des dizaines de milliers d’années, l’objectif n’est pas d’oublier ces déchets mais bien d’en maintenir le plus longtemps possible le souvenir. “*Quels déchets a-t-on stockés ? Où ? Comment ? Pourquoi ? C’est important, pour que les générations futures puissent évaluer ce qu’on a fait. Et aussi pour éloigner le plus possible l’éventualité d’une intrusion involontaire*”, souligne Jean-Noël Dumont, coordinateur du programme Mémoire de l’Andra.

Or, comment garder des traces et des documents aussi longtemps ? Des CD gravés il y a vingt ans sont déjà illisibles parce qu’ils se sont dégradés ou parce que les formats ne sont plus compatibles... L’Andra a donc préféré le papier dit “permanent”, dont la composition chimique et les procédés de fabrication garantissent une durée de vie exceptionnelle. “*En conditions normales de conservation, il traverse six à dix siècles sans problème*”, certifie Jean-Noël Dumont. Inconvénient : outre que cela est loin de couvrir toute la période durant laquelle les déchets continueront d’émettre leur funeste radioactivité, cela peut surtout vite représenter une montagne de plusieurs centaines de milliers de pages. “*On continue donc à chercher d’autres supports, comme des disques protecteurs en saphir synthétique, entre lesquels on insère le docu-*

ment”, explique Jean-Noël Dumont. L’information pourrait y être condensée sous une forme similaire à un microfilm.

Pour garder une trace sur plusieurs millénaires, différents groupes de travail sur la mémoire réfléchissent aussi à la mise en place de grandes stèles de pierre. Reste à savoir quoi représenter, car à la vitesse à laquelle une langue évolue, il est à craindre que le moindre message écrit ne puisse plus être compris dans plusieurs millénaires. “*Dans les projets sur lesquels nous avons travaillé, il y a juste une évocation de la radioac-*

Réussites et couacs ancestraux

Parmi les objets construits pour défier le temps, il y a eu des succès mémorables comme l’horloge de la cathédrale Saint-Pierre de Beauvais, qui date de 1302 et sonne toujours les heures, après quelques opérations d’entretien en 2017. Ou encore Big Ben, à Londres, construite en 1859 et dont la précision s’explique notamment par un ingénieux double échappement à trois bras. Mais il y a aussi de beaux loupés comme le couvercle du futur réacteur EPR, trop chargé en carbone, qu’il faudra remplacer dès 2024 alors qu’il devait durer plusieurs décennies. Seul l’avenir dira si les projets actuels auront su tenir leurs promesses.

tivité, représentée de façon neutre, car si vous suggérez que c’est dangereux, vous risquez au contraire d’éveiller la curiosité”, explique Jean-Noël Dumont. Reste que notre incompréhension face aux grandes pierres de Stonehenge ou aux géoglyphes de Nazca incite à croire qu’il en sera de même pour nos lointains descendants.

Au bout du compte, le véritable défi de la mémoire des projets à long terme sera de maintenir la motivation sociale. Les cathédrales ont perduré parce que les générations suivantes ont continué d’y voir un intérêt. En sera-t-il de même pour les projets d’aujourd’hui ? Comment décréter ici et maintenant ce qui sera bon pour après-demain ? Même les meilleurs ingénieurs ne sauraient répondre à pareille question. Ce qui ne les empêchera jamais de se lancer dans l’aventure.



À consulter : les sites ou les présentations officielles des différents projets cités dans ce dossier.

EN SAVOIR PLUS

science-et-vie.com