



→ pouirlascience.naturejobs.com

Nouveau service d'offres d'emplois scientifiques sur

POUR LA SCIENCE

en partenariat avec **naturejobs**



- Chaque semaine, plus de **8000 offres d'emploi** dans le secteur des sciences.
- En un clic la **sélection des postes à pourvoir** en France et dans les pays francophones ou voisins.
- Une équipe Naturejobs spécialisée, **au service des recruteurs francophones**.
Contact : Muriel Lestringuez
E-mail : m.lestringuez@nature.com
Tél. : +44 20 7843 4994

POUR LA SCIENCE.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique

du calcaire (CaCO_3). Une cimenterie peut produire jusqu'à 10 000 tonnes par jour de grains de ciment, collectivement nommés clinker. Ces grains sont ensuite broyés en une fine poudre grise et mélangés à du gypse. L'énergie électrique utilisée pour le broyage représente quatre pour cent de la production d'électricité mondiale.

Pour évaluer la durabilité du béton, on doit estimer les coûts économiques, environnementaux, énergétiques et sociétaux des structures construites avec ce matériau. En d'autres termes, il faut effectuer l'analyse « du berceau à la tombe », c'est-à-dire prendre en compte le cycle de vie complet des structures. On montre ainsi que pour un bâtiment, l'énergie nécessaire à la fabrication des matériaux et à la construction représente 10 à 40 pour cent de la consommation totale d'énergie (estimée pour une durée de vie de 70 ans), le reste correspondant à la phase d'utilisation (chauffage, climatisation...). Il est donc essentiel de ne pas négliger cette dernière phase : on cherche par exemple à mieux comprendre le transport de la chaleur dans le matériau et les phénomènes de détérioration, telle l'apparition de fissures, afin de rendre le béton plus isolant et de réduire la consommation énergétique des nouvelles infrastructures.

Jusque récemment, pour améliorer le ciment et le béton, on adoptait une approche itérative descendante ou *top-down* : on testait les propriétés à l'échelle macroscopique, on cherchait à les comprendre par une analyse à l'échelle immédiatement inférieure (de l'ordre du micromètre), on modifiait le matériau et on testait à nouveau les propriétés macroscopiques. Aujourd'hui, une nouvelle approche, dite *bottom-up* (ascendante), se développe. L'analyse commence à l'échelle nanométrique (10^{-9} mètre), où le matériau est décrit comme un assemblage d'atomes et de molécules. Elle fournit les paramètres pertinents pour l'échelle du dessus, et ainsi de suite jusqu'à l'échelle macroscopique.

Plusieurs axes de recherche sont considérés. Le premier consiste à baisser la température de production du clinker, afin de diminuer les émissions de dioxyde de car-

bone. Le deuxième est de développer un processus de broyage du clinker plus économe en énergie, en analysant la fracturation mécanique des grains. Le troisième étudie la dissolution de la poudre de ciment, à la fois par l'expérience et par la modélisation, grâce à des calculs dits *ab initio* (littéralement : depuis le début) sur la réactivité de surface des grains. Le quatrième

EN MODIFIANT LA COMPOSITION chimique, on pourrait utiliser moins de ciment pour construire un bâtiment.

concerne la précipitation de la poudre dissoute, abordée notamment par le biais de simulations multi-échelles combinant approches atomistiques et colloïdales (on se place respectivement à l'échelle des atomes et à celle de particules plus grosses en suspension dans la solution). Enfin, le cinquième porte sur le comportement mécanique de la pâte durcie en fonction de la composition chimique.

Les premiers résultats commencent à être obtenus, notamment grâce à ce cernier axe de recherche. Ainsi, nous avons montré qu'en diminuant le rapport Ca/Si (le nombre d'atomes de calcium sur celui de silicium) de 1,7 à 1, les performances mécaniques du ciment (durée de vie, résistance...) sont multipliées par 1,5 à 2. En modifiant la composition chimique, on pourrait donc utiliser moins de ciment pour construire un bâtiment, ce qui réduirait les émissions de dioxyde de carbone et la consommation d'énergie associées à la fabrication de ce matériau.

Pour avoir un impact important, l'approche *bottom-up* nécessitera une collaboration active des industriels concernés. À ce prix, nous pourrions optimiser les propriétés du ciment, et ainsi améliorer la durabilité des infrastructures. ■

Roland PELLENQ est directeur de l'Unité mixte internationale « Multi-scale materials science for energy and environment » (MSE), comportant des chercheurs du CNRS et du MIT, et installée à Cambridge, aux États-Unis.



Pour réagir aux articles : courrier@pouirlascience.fr
ou directement sur les pages correspondantes du site www.pouirlascience.fr

✓ POINCARÉ FAIT TOURNER LA TÊTE

Dans *Poincaré et la rotation de la Terre*, de J.-M. Ginoux et Ch. Gerini (*Pour la Science* n° 417, juillet 2012, http://bit.ly/417_poincare), on apprend qu'on ne peut pas prouver que la Terre tourne, car il n'existe pas de référentiel absolu. Pourquoi, alors, affirmer que la Terre tourne ?

Martin Maussac

Un autre élément a cependant joué un rôle important dans la polémique suscitée par Poincaré : la beauté et la simplicité de l'expérience du pendule de Foucault, qui fournit une démonstration évidente de la rotation de la Terre, rendue ainsi accessible à tous. Ce qu'on ne pardonna pas à Poincaré, ce n'est pas tant d'avoir remis en cause la rotation de notre globe, mais plutôt d'avoir pointé du doigt un défaut rédhibitoire dans cette démonstration « populaire ».

→ RÉPONSE DES AUTEURS

Bien qu'il ait participé le 22 octobre 1902 à l'inauguration de la réinstallation du pendule de Foucault au Panthéon, Henri Poincaré fit remarquer que cette expérience ne prouvait pas la rotation de la Terre, puisque nous ne pouvons observer que des mouvements relatifs.

Le 26 octobre 1902, le chroniqueur scientifique du journal *La Croix* relata ainsi l'expérience : « Sous l'action de la pesanteur, le pendule, écarté de la verticale, y reviendra par une série d'oscillations successives s'effectuant dans un plan fixe, puisqu'aucune force n'agit pour changer ce plan, et comme la Terre tourne au-dessous du pendule, le plan d'oscillation de ce dernier paraîtrait tourner relativement à la Terre en sens contraire de la rotation [...]. En visant une étoile située dans le plan d'oscillation, le pendule ne la quittera donc pas, tant que durera l'expérience. »

L'étoile visée est généralement l'étoile polaire ou Bêta du Centaure, considérées suffisamment éloignées de la Terre pour sembler immobiles, et de ce fait qualifiées d'« étoiles fixes ». Cependant, au voisinage du Soleil, la vitesse relative des étoiles – et donc des étoiles dites fixes – est de l'ordre de 20 kilomètres par seconde. Ce résultat était déjà connu à l'époque de Poincaré. Ainsi, les étoiles auxquelles on se réfère ne constituant pas un référentiel absolu, on ne peut affirmer que l'expérience du pendule prouve que la Terre tourne.

Toutes les observations vont dans le même sens : aplatissement de la Terre aux pôles, déviation vers l'Est lors de la chute libre, etc. On est obligé d'admettre que la Terre tourne, mais, dans la mesure où l'on ne peut observer que des mouvements relatifs, on ne peut pas le prouver.



Le rayon vert, vu de l'Observatoire de Paranal (désert de l'Atacama, Chili), où est installé le grand télescope VLT de l'ESO (l'Observatoire européen austral).

✓ RAYON VERT DANS UN CIEL PAS BLEU

Dans *Pourquoi le ciel n'est pas bleu* (*Pour la Science* n° 418, août 2012, http://tiny.cc/418_idphys), J.-M. Courty et É. Kierlik expliquent le rougissement du ciel au coucher du Soleil, mais n'évoquent pas le mystérieux « rayon vert » que l'on peut en théorie observer juste avant que le Soleil ne disparaisse derrière l'horizon. Quelle est l'origine de ce rayon vert et dans quelles conditions se manifeste-t-il ?

Pierre Richet-Gaudin

→ RÉPONSE DES AUTEURS

Le mystérieux rayon vert évoqué par notre lecteur est un phénomène exceptionnel, mais bien réel, dont on pourra avoir un aperçu photographique en consultant l'ouvrage *Aurores*,

mirages, éclipses de D. K. Lynch et W. Livingston (Dunod, 2002).

Pour le comprendre, la physique évoquée dans *Pourquoi le ciel n'est pas bleu*, la diffusion préférentielle par l'atmosphère de la lumière bleue, ne suffit pas : il faut y ajouter le phénomène de réfraction atmosphérique et la dispersion chromatique qui lui est associée. L'atmosphère n'est pas un milieu homogène, sa densité moléculaire décroît avec l'altitude. Il s'ensuit que l'indice de réfraction diminue aussi. En vertu des lois de Snell-Descartes, comme dans le phénomène de mirage, les rayons lumineux ne se propagent alors pas selon une trajectoire rectiligne. Ils se réfractent progressivement avec une courbure dirigée vers le milieu le plus dense, donc vers la Terre.

Une première conséquence est que la position apparente du Soleil est plus haute sur l'horizon que sa position réelle. L'effet est très faible, mais suffisant pour qu'à son coucher, alors que le Soleil semble effleurer l'horizon, il est en réalité déjà dessous.

En outre, comme pour l'eau ou le verre, l'indice de réfraction de l'air dépend de la couleur. L'atmosphère se comporte donc comme un prisme qui dévie davantage le bleu et le vert que le jaune ou le rouge.

De ce fait, on peut imaginer que le Soleil que nous voyons se coucher est constitué de la superposition, en descendant vers l'horizon, d'un soleil bleu, d'un soleil vert, d'un soleil jaune, d'un soleil rouge, etc. À cause du phénomène de diffusion (discuté dans notre chronique d'août), le soleil bleu a pratiquement disparu au niveau de l'horizon et il subsiste un peu du soleil vert. Le soleil rouge prédomine, mais comme ses rayons sont moins déviés, il disparaît entièrement le premier. C'est à ce moment que notre œil peut saisir fugitivement l'extrémité supérieure du soleil vert qui n'a pas encore totalement disparu : c'est le fameux rayon vert.

Les écarts entre tous ces soleils étant très faibles, même à l'horizon, l'observation du phénomène est difficile et nécessite pour le moins un horizon bien dégagé et une atmosphère limpide et calme. L'un de nous a cru apercevoir le rayon vert sur les côtes atlantiques, mais rien n'est moins sûr...