

dogues, ils passent l'essentiel de leur temps au large et semblent ne faire que des visites courtes et peu nombreuses près de la côte.

Un autre pan de la première phase de CHARC a consisté à étudier les statistiques des données historiques des attaques à La Réunion depuis 1980. Cela a permis d'associer à ces attaques certains facteurs tels que la turbidité des eaux et la période dans la journée (proche du coucher de soleil).

La suite du programme CHARC devra préciser tout cela et répondre à de nombreuses autres questions. Il s'agira en particulier de déterminer comment les conditions environnementales (turbidité, houle, salinité, température, aquaculture, zones de surf, présence d'autres espèces, d'effluents, etc.) influent sur les zones de prédilection des requins, leurs déplacements et leur comportement.

En l'absence de ces informations scientifiques, une stratégie cohérente de prévention du risque est illusoire. Mais on peut d'ores et déjà affirmer que des opérations de prélèvement de requins ne sont pas une solution, ni à court terme ni à long terme. Et cela indépendamment des préoccupations écologiques sur les requins et leur rôle dans la chaîne alimentaire des océans.

La forte capacité des deux espèces de requins à se déplacer sur l'ensemble de la côte, voire dans l'ensemble de l'océan Indien, montre que la pêche aux squales sera non seulement coûteuse, mais aussi inefficace, les requins présents à un instant donné et dans une zone donnée variant de façon aléatoire. Le prélèvement pourrait même produire l'effet inverse de celui recherché : on risque de prélever des requins plutôt côtiers, ce qui pourrait laisser le champ libre à des

requins plus pélagiques, tel le requin tigre. Par ailleurs, une traque des requins pourrait compromettre le programme de recherche CHARC, en perturbant les animaux et leur suivi.

Des opérations de prélèvement ne donneraient qu'un faux sentiment de sécurité et n'apporteraient aucun élément utile à la gestion du danger à long terme. En attendant les résultats des études lancées, il est préférable d'informer le mieux possible les plaisanciers des risques qu'ils prennent. ■

Antonin BLAISON, spécialiste du comportement des requins, est ingénieur de recherche à l'IRD. Il participe au programme CHARC.

International Shark Attack File (site du Muséum de Floride) : www.flmnh.ufl.edu/fish/sharks/isaf/isaf.htm

 Réagissez en direct à cet article sur www.pourlascience.fr

DÉVELOPPEMENT DURABLE

Vers un ciment durable : partir de l'échelle atomique

Le ciment est omniprésent dans nos infrastructures. En étudiant ses propriétés à toutes les échelles, on tente d'améliorer son bilan écologique.

Roland Pellenq

La fabrication du ciment est responsable de cinq à dix pour cent des émissions industrielles de dioxyde de carbone. Sous sa forme hydratée, ce matériau est la « colle » qui donne ses propriétés mécaniques au béton, constitué d'agréats (tels que des graviers) liés par des hydrates cimentaires. Mélangé à de l'eau, le ciment passe d'une pâte quasi liquide à un matériau plus dur que la plupart des minéraux – on le surnomme d'ailleurs « pierre liquide ». La prise du ciment, et donc du béton, en une dizaine d'heures, permet la construction et la réparation rapides d'ouvrages variés (chaussées, ponts, bâtiments,

voies navigables, centrales nucléaires...). Le béton est essentiel aux infrastructures modernes, qui se multiplient avec l'urbanisation – plus de la moitié de la population mondiale (soit plus de trois milliards d'individus) vit aujourd'hui en ville. En moyenne, chaque habitant de la planète consomme annuellement 2,8 tonnes de ce matériau, qui alimente un marché mondial d'environ 30 milliards d'euros par an.

Aucun matériau connu n'est susceptible de remplacer le béton, dont le coût et la disponibilité sont inégalés. Dès lors, il est crucial d'élaborer un béton – et donc un ciment – « durable ». C'est ce qu'on s'ap-

plique à faire par une nouvelle approche, où l'on part de l'échelle atomique pour comprendre et améliorer les propriétés macroscopiques du ciment.

Les hydrates cimentaires se forment par dissolution et précipitation d'une poudre grise de ciment, que l'on mélange avec de l'eau. Cette poudre est fabriquée localement à partir de calcaire et d'argile, abondants dans la nature. Ils sont mélangés, puis chauffés à environ 1 500 °C dans un grand four rotatif, mesurant jusqu'à 200 mètres de longueur. Le dioxyde de carbone est émis à la fois par la combustion (de fuel, de charbon...) lors du chauffage et par la décomposition



→ 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.

Votre vocation
fait votre fierté,
la nôtre est de vous assurer.



OFFRE SPÉCIALE
POUR LES MOINS DE 30 ANS

100 €
OFFERTS*

sur vos assurances
AUTO et SANTÉ
Idéal pour bien débiter !

Pour découvrir les avantages qui vous sont réservés :

- Appelez le 0 970 809 809 (numéro non surtaxé)
- Connectez-vous sur www.gmf.fr



Assurément Humain

* Offre réservée aux agents des services publics de moins de 30 ans, la première année à la souscription d'un contrat d'assurance auto et/ou d'un contrat de complémentaire santé. Offre non cumulable avec le tarif avant 30 et valable jusqu'au 31/12/2012. Conditions et détails des prestations dans votre agence GMF ou sur www.gmf.fr.

LA GARANTIE MUTUELLE DES FONCTIONNAIRES et employés de l'État et des services publics et assimilés - Société d'assurance mutuelle. Entreprise régie par le Code des assurances - R.C.S. Paris 775 691 140 - Siège social : 76, rue de Prony - 75857 Paris Cedex 17 et ses filiales GMF Assurances, La Sauvegarde, GMF Vie, Assistance Protection Juridique et Fidélité Assistance - Adresse postale : 45930 Orléans Cedex 9.

ASSURANCES MUTUELLES DE FRANCE - Société d'assurance mutuelle. Entreprise régie par le Code des assurances - R.C.S. Chartres 323 562 678 - Siège social : 7, avenue Marcel Proust 28932 Chartres Cedex 9. Adresse postale : 45930 Orléans Cedex 9.

Les contrats complémentaires santé sont souscrits par l'ADACCS auprès de GMF Assurances et La Sauvegarde.



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

→ RÉPONSE DES AUTEURS

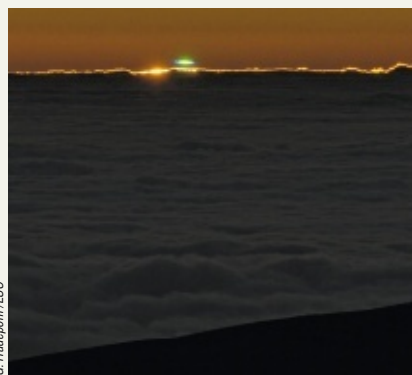
Bien qu'il ait participé le 22 octobre 1902 à l'inauguration de la réinstallation du pendule de Foucault au Panthéon, Henri Poincaré fit remarquer que cette expérience ne prouvait pas la rotation de la Terre, puisque nous ne pouvons observer que des mouvements relatifs.

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.

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 ».



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...