

seulement l'énergie consommée par le thermostat tout au long de son cycle de vie, mais aussi celle de l'infrastructure indispensable à son fonctionnement: le réseau d'accès à Internet qu'il utilise pour communiquer et les serveurs du fournisseur de service qui exécutent des algorithmes d'apprentissage et d'optimisation, et stockent les données produites et les historiques. Or ce coût n'est pas pris en compte dans l'empreinte citée plus haut.

En 2019, avec notre collègue Loïc Guegan, nous avons proposé un modèle pour calculer la consommation électrique totale d'un objet connecté. En l'appliquant à une simulation de thermostat de type Google Nest, nous avons ainsi montré que si le cloud gère un petit nombre de thermostats, sa consommation est supérieure à celle de ces derniers. En revanche, dès que le nombre de thermostats dépasse la vingtaine, l'impact des objets devient prépondérant sur celui du cloud (*voir la figure en bas de la page 56*). Or de tels objets sont destinés à être déployés sur des ensembles de plusieurs centaines de maisons. Reste à comparer cette consommation totale aux gains énergétiques que ces objets entraînent.

À l'inverse, la consommation d'autres objets repose beaucoup plus sur le cloud. En 2018, avec d'autres collègues, nous avons ainsi montré que, dans le cas d'une webcam qui transfère ses données par wifi à un serveur du cloud effectuant de la reconnaissance d'images, la partie cloud consomme en moyenne deux fois plus d'électricité que l'objet lui-même. Voire trois fois plus si au lieu d'être constitué de grandes fermes de calcul, comme actuellement Google (qui compte une vingtaine de grands centres de données répartis dans le monde), le cloud est déployé en une multitude de petits centres de données plus proches des utilisateurs, comme cela se développe de plus en plus, notamment en lien avec la 5G.

Nous nous intéressons par ailleurs à d'autres systèmes numériques apparus ces dernières années et faisant intervenir des objets connectés: les «réseaux électriques intelligents». Ces réseaux de distribution d'électricité utilisent les informations reçues de chaque consommateur à l'aide d'un boîtier (le compteur Linky d'Enedis, en France, par exemple) pour ajuster le flux d'électricité et permettre à terme de mieux gérer les fluctuations de consommation et de production, plus particulièrement la production de sources d'énergie renouvelable. Les fournisseurs d'électricité défendent l'idée que ces réseaux vont permettre de réduire la consommation énergétique, mais sans se préoccuper de la consommation même de ces réseaux. Quel coût énergétique cette intelligence rajoute-t-elle? Peut-on l'optimiser?

Très peu d'informations sont disponibles concernant la consommation de ces

Chacun peut s'engager dès maintenant sur la voie de la sobriété numérique

équipements intelligents. En revanche, il est possible de modéliser la façon dont les données circulent et comment cela impacte les services du réseau électrique. C'est ce que nous avons fait tout récemment avec des collègues sur un boîtier fictif afin d'optimiser l'infrastructure matérielle et logicielle nécessaire pour obtenir des approches d'effacement de charge réactives et efficaces (*voir l'encadré page 57*). Ces approches pourraient finalement permettre de limiter le surdimensionnement des réseaux de distribution d'électricité en atténuant les pics de consommation, liés notamment aux véhicules électriques.

VERS UNE SOBRIÉTÉ NUMÉRIQUE

Ainsi, de nombreuses pistes se dessinent pour réduire les impacts environnementaux d'Internet et sont explorées par les académiques et les industriels. Certaines, comme l'amélioration de la proportionnalité énergétique, le ciblage des gaspillages et l'écoconception matérielle et logicielle, visent à améliorer l'efficacité énergétique. D'autres, comme l'allongement de la durée de vie et de l'usage des équipements ou la conception de métriques rendant compte de l'impact environnemental réel des équipements afin de les rendre comparables, tant pour sensibiliser le grand public que pour informer les pouvoirs publics, tendent vers une sobriété numérique.

Toutes doivent nous aider à nous interroger sur les pratiques de construction d'Internet et sur nos usages. Les accords de Paris sur le climat nous demandent de réduire notre empreinte carbone, et on pense souvent qu'Internet va être la solution. Mais le numérique n'échappe pas à ces accords. Il est indispensable de prendre en compte ses impacts environnementaux, de les maîtriser et les réduire. Et chacun de nous peut s'engager dès maintenant sur cette voie en conjuguant chez soi efficacité énergétique, sobriété numérique et usage raisonné. ■

BIBLIOGRAPHIE

B. Camus et al., **Co-simulation of an electrical distribution network and its supervision communication network, 2020 IEEE 17th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)**, pp. 1-6, 2020.

L. Guegan et A.-C. Orgerie, **Estimating the end-to-end energy consumption of low-bandwidth IoT applications for WiFi devices, 2019 IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom)**, pp. 287-294, 2019.

I. Raïs et al., **Quantifying the impact of shutdown techniques for energy-efficient data centers, *Concurr. Comp. Pract. Exp.*, vol. 30(17), pp. 1-13, 2018.**

Y. Li et al., **End-to-end energy models for edge cloud-based IoT platforms: Application to data stream analysis in IoT, *Future Generation Computer Systems*, vol. 87, pp. 667-678, 2018.**

L'ESSENTIEL

> Les vents, les pluies et les vagues associés aux cyclones ont un impact destructeur majeur sur les infrastructures et les écosystèmes.

> Les principaux mécanismes de formation des cyclones sont assez bien compris. Des progrès technologiques récents offrent la perspective d'une compréhension plus fine des processus d'intensification et de formation de l'œil.

> Les épisodes cycloniques semblent de plus en plus nombreux et destructeurs, une impression en partie biaisée par l'amélioration de la surveillance satellite et par la densification des aménagements littoraux.

> Néanmoins, le changement climatique semble favoriser la formation d'ouragans puissants et accroître leur dangerosité.

LES AUTEURS



EMMANUEL DORMY
directeur de recherche
du CNRS, professeur
à l'École normale
supérieure et
à Sciences Po, à Paris



LUDIVINE ORUBA
maîtresse de conférences
à Sorbonne Université, au
Laboratoire atmosphères,
milieux et observations
spatiales, à Paris

En 2018, le cyclone tropical Florence, ici vu depuis la *Station spatiale internationale*, a atteint la catégorie 4 au-dessus de l'Atlantique puis a rapidement diminué en intensité. Il a néanmoins provoqué de nombreux dégâts et plusieurs dizaines de morts aux États-Unis.

Des cyclones plus destructeurs?

Ces dernières décennies, Katrina, Idai, Harvey et bien d'autres ouragans ont semé le chaos sur leur passage. Ces phénomènes paraissent plus fréquents et plus violents, mais le sont-ils réellement? La réponse des chercheurs est nuancée.



Ouragans dans l'Atlantique nord, typhons dans le nord-ouest du Pacifique ou encore cyclones tropicaux dans l'océan Indien, tous ces termes désignent le même phénomène météorologique, parmi les plus spectaculaires et les plus destructeurs de la planète. Lorsqu'un cyclone se forme, c'est la dynamique atmosphérique qui s'emballe, s'amplifie et finit par libérer des quantités gigantesques d'énergie. Les vents atteignent jusqu'à 300 kilomètres par heure, soit la vitesse d'un TGV. Des débris de toutes sortes (morceaux de bois, tôles) deviennent alors autant de projectiles menaçants. Mais ces effets dévastateurs ne sont rien en comparaison de ceux que provoquent les fortes précipitations et les crues de plusieurs mètres de hauteur qui accompagnent le phénomène.

Ainsi, en 2005, le cyclone Katrina a complètement inondé La Nouvelle-Orléans et ses environs. Le bilan s'est élevé à 1800 morts et les dégâts ont été chiffrés à 108 milliards de dollars. Plus récemment, en 2019, le cyclone Idai a touché les côtes du Mozambique, où il a déversé des trombes d'eau qui ont coûté la vie à plus de 1000 personnes. Mais ces deux cyclones ne font pas figure d'exceptions. Chaque année, ils sont plusieurs à ravager les régions qu'ils traversent.

La menace que les ouragans font peser sur les populations côtières et l'impact financier qu'ils représentent incite à les surveiller de près et à comprendre comment ce phénomène prend forme, se développe et évolue. L'un des objectifs est d'anticiper leur arrivée pour limiter les dégâts qu'ils provoquent et mettre les habitants à l'abri. Les données toujours plus complètes et précises révèlent cependant une tendance alarmante : l'effet destructeur des cyclones semble être à la hausse au cours de ces dernières décennies. Ce constat est-il réel ou le résultat de biais observationnels ?

DES SATELLITES DE SURVEILLANCE

Pendant longtemps, les seuls témoins de ce phénomène ont été les marins et les populations vivant dans les régions touchées par les cyclones. Les premières descriptions consignées par écrit datent du XVII^e siècle. Ainsi, vers 1650, le géographe allemand Bernhardus Varenius s'est intéressé aux tempêtes tropicales et a dépeint les cyclones comme des tourbillons. Mais c'est au XIX^e siècle que leur suivi scientifique a vraiment commencé, sous l'impulsion notamment de Henry Piddington, capitaine de la marine marchande britannique. On lui doit le terme de « cyclone », du grec *kýklos*, la roue ou le cercle. Puis, au cours du XX^e siècle, les techniques d'observation se sont nettement enrichies, en

particulier grâce aux satellites météorologiques à partir des années 1970. Enfin, en 2017, la Nasa a lancé la constellation CYGNSS (*Cyclone Global Navigation Satellite System*), dédiée spécifiquement à la surveillance des cyclones. Cette dernière est parfois complétée avec l'utilisation d'avions ou, depuis une dizaine d'années, de drones qui effectuent des vols de reconnaissance à l'intérieur même des cyclones.

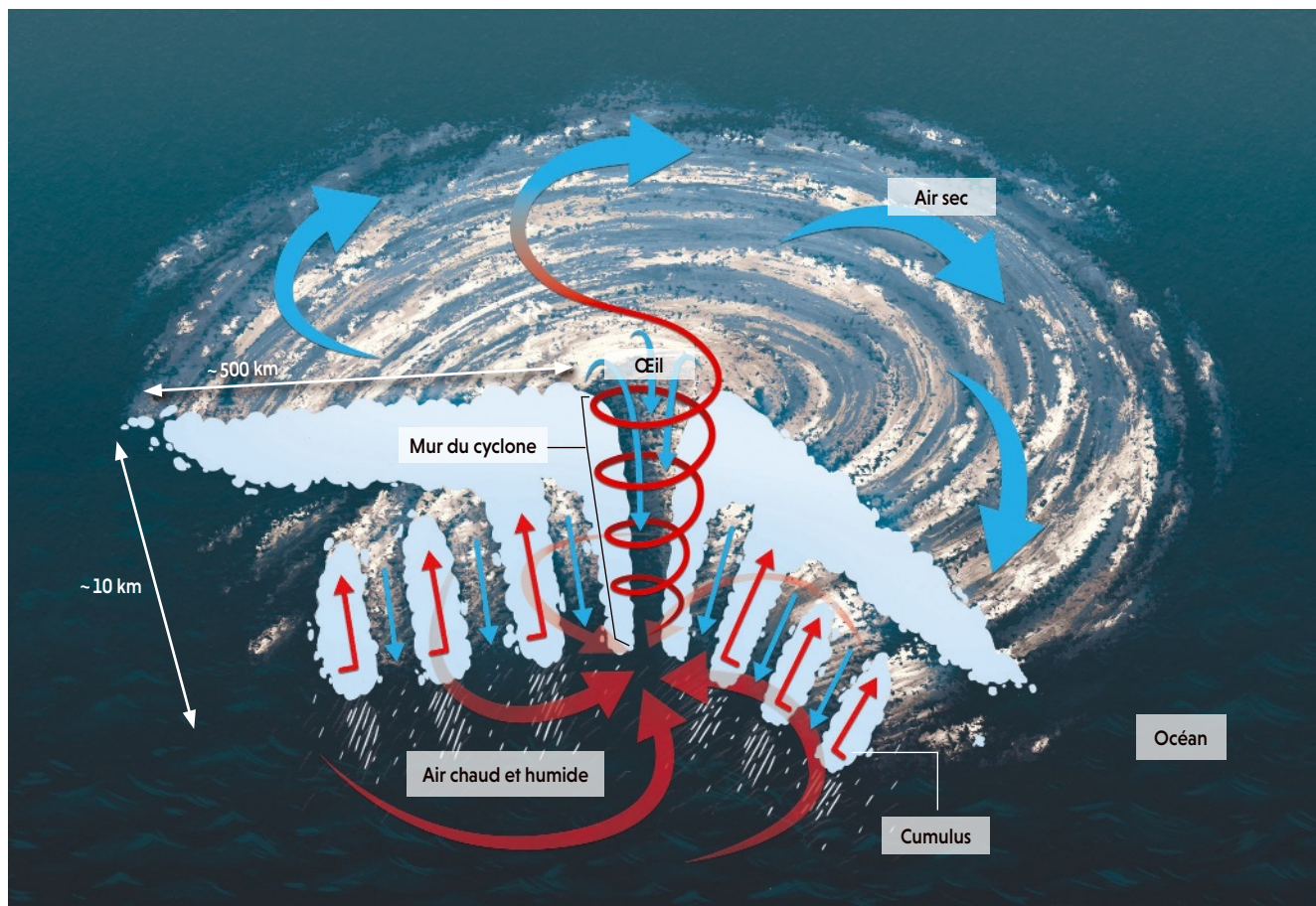
Cette amélioration des techniques de suivi permet l'étude de cyclones qui seraient autrefois passés inaperçus. Les satellites détectent par exemple des ouragans qui se forment en mer, mais diminuent d'intensité ou dispa-

Le bilan de Katrina s'est élevé à 1800 morts et les dégâts ont été chiffrés à 108 milliards de dollars

raissent avant de toucher les côtes. Un autre facteur important a contribué à l'impression qu'il y a davantage de cyclones : la population côtière. Plus de 20% de la population mondiale vit actuellement à moins de 30 kilomètres des côtes et ce chiffre ne fait qu'augmenter. Il y a donc plus de risques qu'un cyclone frappe une zone habitée et provoque de nombreux dommages.

Mais la meilleure surveillance et la répartition de la population ne suffisent pas à expliquer l'augmentation de la dangerosité des ouragans. Les simulations numériques, qui ont connu de substantielles améliorations ces dernières décennies grâce à l'utilisation d'ordinateurs de plus en plus puissants, prévoient une croissance de l'intensité des cyclones dans le contexte d'un changement climatique lié aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre.

Pour appréhender cette évolution conjointe des cyclones et du climat, il faut d'abord comprendre les mécanismes qui confèrent autant d'énergie à ce phénomène et rendent les cyclones si dangereux. Le point de départ se situe dans les océans tropicaux, qui accumulent l'énergie du rayonnement solaire sous la forme de chaleur. La température de l'eau de surface peut atteindre 30 °C à la fin de l'été. Cette couche d'eau chaude s'étend en profondeur,



sur des épaisseurs allant de quelques mètres à près d'une centaine de mètres. Elle représente un formidable réservoir d'énergie susceptible d'être transmis à l'atmosphère.

Ce transfert se fait en premier lieu par conduction thermique: l'eau de surface chauffe l'air juste au-dessus. Le gaz à la base de l'atmosphère se dilate et devient plus léger que l'air environnant. En vertu de la poussée d'Archimède, il subit une force l'entraînant vers le haut. Un second effet, plus subtil, vient renforcer ce mouvement: l'évaporation. L'air chaud est capable d'absorber une quantité plus importante de vapeur d'eau que l'air froid (le linge sèche plus vite en été!). Or la vapeur d'eau pèse moins lourd que l'air sec. Les deux effets se renforcent, de sorte que l'air chaud et humide s'élève vers des couches plus hautes de l'atmosphère. L'énergie thermique se transforme ainsi en énergie cinétique: des courants ascendants apparaissent. Ce phénomène est à l'origine de la formation des cumulus, ces gros nuages blancs fréquents sous les tropiques.

LE RÔLE CLÉ DE LA VAPEUR D'EAU

Quand les bonnes conditions sont réunies, ce puissant panache ascendant est encore renforcé par un autre ingrédient: la pluie. Lorsque

l'air chaud et humide est entraîné rapidement en altitude, il se refroidit. Il ne peut plus alors contenir autant de vapeur d'eau, celle-ci se condense et de la pluie se forme. Les volumes de vapeur d'eau impliqués dans ce processus sont très importants. Or la condensation des gouttelettes libère de la chaleur, car il s'agit d'un changement de phase exothermique (c'est le processus inverse de l'évaporation: lorsqu'on porte un vêtement mouillé en plein été, l'évaporation refroidit celui-ci). Ainsi, avec la formation de la pluie, l'air se réchauffe davantage et monte d'autant plus vite: la machine atmosphérique s'emballe!

Ces courants d'air ascendants ne constituent pas encore des cyclones. Il faut y ajouter un nouvel acteur, la force de Coriolis. Le courant vertical d'air chaud et humide crée une zone de dépression à sa base vers laquelle de grandes masses d'air convergent horizontalement. Ce problème rappelle celui de la baignoire qui se vide. Un flux horizontal se met en place pour remplacer l'eau évacuée par le siphon. On remarque que le courant ne s'écoule pas en ligne droite: le liquide forme un tourbillon autour du trou de la baignoire. Cela tient à la conservation du moment cinétique, une propriété liée au fait que les lois de la physique

Un cyclone est avant tout alimenté par l'air chaud et humide qui s'élève depuis la surface de l'océan. La condensation de l'air apporte des précipitations et un supplément de chaleur. Le système s'emballe et les vents atteignent jusqu'à 300 kilomètres par heure. La force de Coriolis due à la rotation de la Terre imprime un mouvement tournant au cyclone. Au centre, une zone calme se forme, c'est l'œil du cyclone.

>

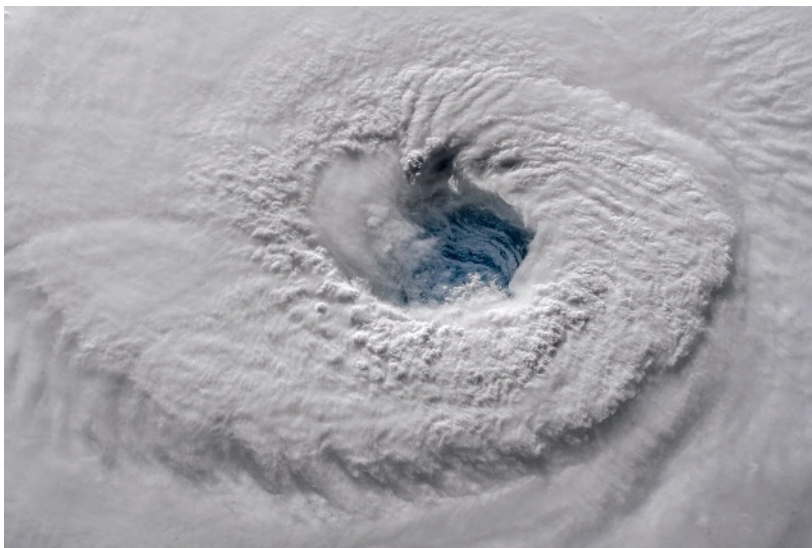
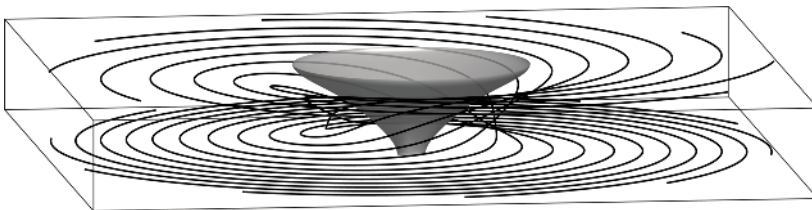
- sont invariantes par rotation dans l'espace. Pour la même raison que les patineurs tournent plus vite sur eux-mêmes lorsqu'ils ramènent les bras le long du corps, un mouvement résiduel de l'eau presque invisible à l'échelle du bain s'amplifie quand le liquide s'approche du siphon. La vitesse de rotation de l'eau autour de l'axe du siphon augmente à mesure que le fluide se rapproche du trou d'évacuation. La conservation du moment cinétique est le seul effet qui compte à l'échelle d'une baignoire. Ainsi, le sens de rotation ne dépend pas de l'hémisphère où l'on se trouve (contrairement à ce que l'on peut parfois entendre).

En revanche, à l'échelle de l'atmosphère, la rotation de la Terre sur elle-même influe sur les mouvements des masses d'air. C'est la «force» de Coriolis (en toute rigueur, il s'agit d'une pseudoforce, car elle est due à la rotation du référentiel dans lequel on étudie le phénomène, la Terre, et non à l'action d'un corps sur un autre). Inefficace à petite échelle, la force de Coriolis devient prépondérante pour dévier les masses d'air de l'atmosphère qui convergent vers une zone de dépression. Ces courants dévient et tournent toujours dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Sud et dans le sens opposé dans

l'hémisphère Nord. La forme des cyclones commence à se dessiner.

Point crucial, la force de Coriolis est maximale au pôle Nord et diminue jusqu'à s'annuler à l'équateur, puis elle change de sens quand on passe dans l'hémisphère Sud et atteint de nouveau un maximum au pôle austral. Les latitudes les plus élevées semblent donc favorables à la formation des cyclones, mais il faut aussi prendre en compte la température des océans. En général, on estime qu'une température minimale de 26 °C fournit une réserve énergétique suffisante pour amorcer un cyclone. Ces conditions sont obtenues au plus près de l'équateur, où la force de Coriolis est à l'inverse la plus faible. En pratique, le meilleur compromis conduit à la naissance des cyclones dans deux bandes comprises entre 10 et 30° de latitude, de part et d'autre de l'équateur.

Une fois formé, un ouragan ne reste pas en place. Il dérive d'une part à cause des vents environnants (associés à la circulation atmosphérique de grande échelle), d'autre part à cause de la force de Coriolis. Comme cette dernière varie avec la latitude, elle ne s'applique pas de la même façon en tout point du cyclone. Conséquence: en l'absence de vents environnants, le cyclone tend à se déplacer vers l'ouest et vers les pôles. L'ouragan persiste au plus quelques semaines avant d'atteindre des terres. Lorsque celles-ci sont habitées, les dégâts sont impressionnants (voir l'encadré page ci-contre). Même lorsqu'elles ne le sont pas, la flore et la faune sont largement détruites. Les récifs coralliens, par exemple, mettent plusieurs années à se reconstruire après le passage d'un cyclone (voir l'encadré page 66).



© L. Oruba et E. Dormy (simulation) : Nasa (photo)

Au centre d'un cyclone se forme généralement un œil, une zone dépourvue de nuages et de vents (comme ci-dessus pour l'ouragan Florence en 2018). Les auteurs de l'article ont modélisé comment les vents se soulèvent de la surface à l'approche de l'axe du cyclone et s'en écartent en s'élevant (en haut). Ils montrent ainsi comment se forme le mur qui entoure l'œil du cyclone.

LA MORT D'UN CYCLONE

Mais privé d'un océan chaud et de l'évaporation associée, le «moteur» de l'ouragan finit par caler. Certains peuvent malgré tout se manifester encore plusieurs jours après avoir touché terre. Ce fut le cas notamment du cyclone Harvey en 2017, qui déversa des pluies diluviennes sur les côtes du Texas pendant cinq jours consécutifs.

En dérivant vers des latitudes plus élevées, le cyclone peut aussi rencontrer des eaux plus froides. Il perd alors en puissance et se transforme en tempête, à l'image du cyclone Ophelia, qui, en 2017, n'était plus qu'une tempête, dite «tempête des moyennes latitudes», en arrivant sur les côtes de l'Irlande.

Un troisième mécanisme peut mettre fin à un ouragan: les vents d'altitude. Si ces vents sont plus forts que les vents de surface, ils «cisaillent» les cyclones, voire bloquent leur formation. Ces vents tendent à incliner les ouragans et le mécanisme d'intensification perd en efficacité. Ils agissent comme un véritable frein. ➤

UN MONSTRE MÉTÉO-ROLOGIQUE

Les cyclones comptent parmi les événements extrêmes les plus dévastateurs. Même si ce n'est peut-être pas la meilleure façon d'évaluer leurs impacts, on peut noter qu'ils ont entraîné en 2017 dans le bassin Atlantique plusieurs centaines de milliards d'euros de dégâts. Ils ont également causé la disparition de plusieurs milliers de personnes.

Les cyclones accumulent une puissance extraordinaire, car ils sont de formidables machines à transformer l'énergie thermique emmagasinée à la surface des océans en vents violents et en pluie. Pour un cyclone moyen, d'un rayon de 200 kilomètres, entraînant 10 centimètres de pluie par jour, la puissance libérée par la chaleur latente de condensation de la vapeur d'eau qui s'élève de la mer peut être estimée à environ 10^{14} watts. Ce chiffre impressionnant doit cependant être considéré avec prudence, car seule une petite fraction de cette énergie thermique sera effectivement convertie en vents. Pour ce même cyclone, en considérant des vents soufflant à 180 kilomètres par heure à 30 kilomètres du centre du cyclone, seuls 10^{12} watts sont nécessaires pour soutenir ces vents. À titre de comparaison, la puissance de production électrique totale de la France s'élève à environ 6×10^{10} watts. Il faut considérer la production mondiale (3×10^{12} watts) pour atteindre l'ordre de grandeur du cyclone considéré ici.

Les vents d'un cyclone peuvent atteindre 300 kilomètres par heure. Ils mettent à l'épreuve les infrastructures et



L'eau et le vent d'un cyclone occasionnent de très nombreux dégâts, à l'image de ceux observés à la Nouvelle-Orléans, aux États-Unis, après le passage de Katrina en 2005 (*en haut*), et dans la région de Beira, au Mozambique, touchée par le cyclone Idai, en 2019 (*en bas*).

transforment en projectiles les morceaux de bois, plaques de tôles et autres débris. On utilise d'ailleurs l'intensité des vents pour classer les cyclones selon l'échelle de Saffir-Simpson (*voir le tableau*). Dans l'Atlantique nord, 14 ouragans de catégorie 5 ont déjà été observés au xxi^e siècle, dont 8 ont dépassé les 280 kilomètres par heure. Les vents sont mesurés à 10 mètres au-dessus du sol et doivent être soutenus sur une minute (on parle de « vents soutenus »). Cette grandeur ne mesure pas nécessairement l'importance des dégâts causés. En 2017, par

exemple, le cyclone Harvey a entraîné des inondations sans précédent qui ont provoqué des dégâts importants au Texas, bien qu'il n'ait atteint « que » la catégorie 4 en touchant les terres et qu'il ait rapidement été rétrogradé au stade de tempête tropicale.

Plusieurs effets se combinent pour créer ces inondations dévastatrices. Tout d'abord, le cyclone étant une dépression (l'air léger ascendant crée une baisse de la pression atmosphérique en surface), le niveau de l'océan monte. De façon imagée, l'eau est aspirée par la baisse de pression. Ensuite, les vents violents du cyclone déplacent des masses d'eau importantes, parfois vers les terres. Ils entraînent aussi des vagues d'amplitudes exceptionnelles. Enfin, les pluies associées à la condensation de l'humidité des océans sont torrentielles. Pour s'en donner une idée, plus de 1 mètre d'eau peut tomber en seulement 12 heures sous un cyclone tropical intense. À titre de comparaison, la pluie apporte en moyenne un peu moins de 1,5 mètre d'eau à Biarritz sur une année entière, le record en France métropolitaine.

Catégorie	Vitesse des vents soutenus (km/h)
Dépression tropicale	< 63
Tempête tropicale	63-118
Cyclone de catégorie 1	119-153
Cyclone de catégorie 2	154-177
Cyclone de catégorie 3	178-208
Cyclone de catégorie 4	209-251
Cyclone de catégorie 5	> 252

L'échelle la plus utilisée pour définir l'intensité d'un cyclone est celle de Saffir-Simpson (du nom de Herbert Saffir, ingénieur civil, et Robert Simpson, alors directeur du NHC, le centre américain des cyclones, à Miami). Les cyclones sont classés en 5 catégories en fonction de la violence de leurs vents.

- > Certaines régions du globe soumises à ces vents d'altitude, telles Hawaï ou la Polynésie française, subissent en pratique moins de cyclones qu'elles ne le devraient si l'on se fie uniquement à la température de surface des océans.

On explique donc relativement bien la dynamique des cyclones de leur naissance à leur mort. Cependant, certains aspects restent encore mal compris et font l'objet de discussions parmi les spécialistes. Par exemple, il ne suffit pas que l'air soit chaud et humide à la surface de l'océan pour qu'un cyclone se forme. Le mécanisme qui conduit à une élévation de cet air correspond à une instabilité dite «linéaire» (ou «supercritique»), car elle croît à partir d'une perturbation, aussi petite soit-elle (c'est par exemple le cas de l'effet Larsen, un micro orienté vers un haut-parleur amplifie un son initialement inaudible qui devient un sifflement strident). En général, cette instabilité linéaire entraîne simplement la formation de cumulus, qui se transforment à terme en orages. Pour déclencher la formation d'un cyclone, il faut que certaines conditions supplémentaires

soient remplies. On parle alors d'une instabilité non linéaire (ou sous-critique), car une perturbation assez grande est nécessaire pour amorcer le phénomène, de la même façon qu'on utilise un démarreur électrique pour lancer le moteur thermique d'une voiture.

Dans le cas des cyclones, il faut une organisation particulière des vents pour entraîner le système. Ces conditions sont encore assez mal connues, même si l'on sait, par exemple, que des perturbations de la circulation atmosphérique, nommées «ondes africaines d'est», contribuent à la naissance des ouragans dans l'océan Atlantique. Ces ondes sont engendrées en Afrique du nord puis se propagent vers l'ouest en direction des Caraïbes.

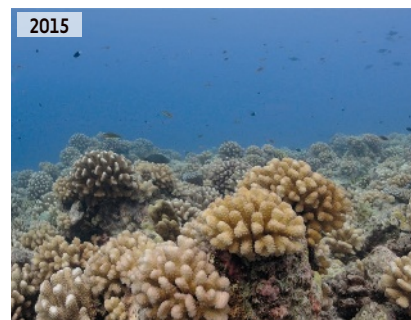
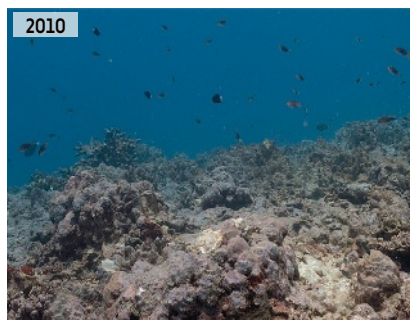
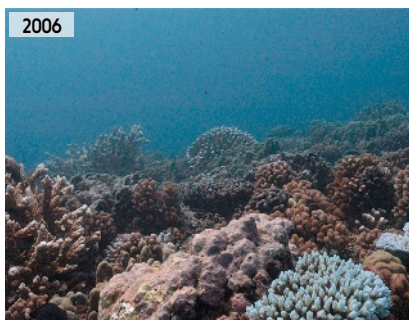
Dès les années 1960, les chercheurs ont essayé de comprendre les dessous du processus d'intensification qui permet de basculer du stade de tempête à celui du cyclone tropical. L'un des premiers mécanismes proposés, CISK, repose sur l'existence d'une convergence de vents à grande échelle vers le centre dépressionnaire. Dans les années 1980-1990, Kerry

LA RÉSILIENCE DES CORAUX

Les cyclones ne frappent pas uniquement les habitants et les infrastructures. Ils ont aussi un fort impact sur la nature. Par exemple, Yannick Chancerelle, du Centre de recherches insulaires et observatoire de l'environnement, a étudié l'impact sur les coraux du cyclone Oli, de catégorie 4, qui a frappé l'île de Moorea, en Polynésie française, en 2010. Le récif, déjà affaibli par les effets du réchauffement climatique et l'augmentation de la température des océans, a été largement détruit. Dans un paysage lunaire, plus une seule colonie corallienne n'était visible.

En passant, le cyclone a détaché de gros blocs de corail qui ont « raboté » le fond. Une technique utilise d'ailleurs ce genre de débris de coraux pour dater de façon indirecte (par datation isotopique, radiocarbone, etc.) des épisodes cycloniques du passé (on parle de paléocyclones) qui ne peuvent être documentés autrement. Dans le cadre d'un suivi systématique du récif, Yannick Chancerelle a photographié un site précis du récif par 10 mètres de profondeur, sur le tombant externe de l'île. Grâce à des conditions favorables à la croissance des coraux, ces derniers se sont reconstruits rapidement, en quelques années, après

le passage d'Oli. On parle alors de résilience : on assiste à un véritable feu d'artifice de corail. Après ces prises de vues, ce récif a malheureusement connu un épisode de blanchiment majeur en 2019, probablement lié au réchauffement. Soumis à la pression anthropique directe (pollution des côtes), au réchauffement climatique et à la colère des cyclones, ces systèmes sont particulièrement exposés. Si leur résilience leur permet de se reconstruire après des événements extrêmes de courte durée, leur capacité à survivre à des modifications durables du climat est malheureusement des plus incertaines.



Le même récif corallien a été photographié en 2006, avant le passage du cyclone Oli, en 2010, quelques jours après le passage d'Oli, et en 2015. Après avoir été détruits, les coraux se sont reconstruits en quelques années.

Emanuel, du MIT, a proposé un autre modèle en introduisant la théorie WISHE, qui repose sur un élément clé: l'action de vents forts permettant une évaporation plus importante à la surface de l'océan. Plus les vents soufflent fort, plus l'évaporation est efficace – un mécanisme qui renforce les échanges d'énergie entre l'océan et l'atmosphère.

Enfin, grâce à des simulations numériques tridimensionnelles, Michael Montgomery, de la Naval postgraduate school, en Californie, et Roger Smith, de l'université de Munich, ont mis en évidence l'importance de structures atmosphériques tridimensionnelles que l'on appelle des «tours de convection». Elles joueraient un rôle essentiel dans l'intensification du cyclone global en renforçant les vents de sa structure. Le mécanisme d'intensification est encore très débattu au sein de la communauté scientifique. Il faut surtout retenir que ce sont les vents préexistants qui déterminent l'évolution, ou non, vers un cyclone tropical.

LE CALME AU MILIEU DE LA TEMPÊTE

La formation de l'œil du cyclone est un autre aspect qui fait toujours l'objet de recherches. La région centrale du cyclone, de forme conique, constitue sa caractéristique la plus étonnante: souvent visible depuis l'espace, contenant peu ou pas de nuages, cette zone jouit d'un calme absolu au milieu de la tempête (voir les images page 64). Cela est d'autant plus surprenant que lorsqu'on se rapproche de cette région, les vents se font de plus en plus intenses. On atteint alors le «mur», où les vents dépassent parfois 300 kilomètres par heure et où les pluies sont les plus intenses. Mais dès que le mur est franchi, on entre dans l'œil du cyclone, dont le rayon est d'environ 50 kilomètres. Le ciel devient bleu, la pluie et les vents cessent. En 2010, lors du passage du cyclone Oli, de catégorie 4, les habitants de la petite île française de Tubuai, dans l'océan Pacifique sud, ont vécu ce moment de répit dans l'œil du cyclone. Mais le calme n'est que de courte durée. En quelques heures, on se retrouve de l'autre côté de l'œil où l'on franchit à nouveau le mur. Les vents sont immédiatement très violents et soufflent dans le sens opposé!

Les mécanismes responsables de la formation de l'œil et du mur qui l'enveloppe restent mal compris et très controversés. L'une des explications le plus souvent avancées repose sur la libération de chaleur latente. L'air humide monte dans le mur avant d'arriver au centre du cyclone; il libère sa chaleur et renforce ainsi le mur. Devenu froid et sec, l'air redescend alors le long de l'axe; on parle de subsidence. Par conséquent, sans humidité présente, l'œil est souvent dépourvu de nuages. Mais ce mécanisme avancé dans les années 1980 est avant tout une

description phénoménologique de ce qui se passe et suppose déjà l'existence du mur. Il n'explique donc pas la formation de l'œil. Par ailleurs, plusieurs simulations numériques ont montré que l'œil se forme même en l'absence de condensation et de libération de chaleur latente.

En 2018, nous avons proposé un mécanisme reposant sur l'extraction de tourbillons de la couche limite atmosphérique. L'air qui converge vers la zone de dépression est doté de deux mou-

Le XXI^e siècle a déjà connu 14 ouragans de catégorie 5

NOMS DE CYCLONES

Les marins donnaient autrefois des prénoms surtout féminins aux cyclones. Depuis les années 1970 et le mouvement féministe aux États-Unis, un ouragan sur deux porte un prénom masculin. Le centre américain des cyclones, à Miami, établit six listes de noms suivant les lettres de l'alphabet pour six années consécutives et réutilisées par la suite. Lorsqu'un ouragan est particulièrement dévastateur, son nom est remplacé dans la liste («Harvey» a été remplacé, après 2017, par «Harold»). Seules deux lettres manquent à la liste : Q et U, par manque d'imagination. Il n'y a donc pas à craindre de cyclones Quentin ou Ursula ! En 2020, pour la deuxième fois après 2005, la liste a été épuisée. On utilise alors l'alphabet grec pour nommer les cyclones.

vements propres: il tourne autour du centre de la dépression à cause de la force de Coriolis (on parle de «vorticité axiale») et il spirale sur lui-même dans un plan perpendiculaire à ce premier mouvement (on parle de «vorticité azimutale»). Lorsque cet air quitte la surface de l'océan pour s'élever en altitude, il conserve ces deux vorticités. La vorticité azimutale conduit le vent à s'écarter de l'axe alors qu'il monte. On obtient ainsi la forme conique de l'œil. Et, simultanément, cette vorticité entraîne l'air sec d'altitude vers le sol au centre du cyclone, comme observé. Le modèle s'appuie sur un système simplifié afin de bien comprendre les phénomènes en jeu. Des simulations numériques plus réalistes sont en cours pour confirmer ce scénario.

Malgré ces inconnues, les spécialistes tentent déjà de comprendre comment les cyclones évoluent dans un contexte de changement climatique. Ce dernier se traduit en particulier par une hausse des températures océaniques et une élévation du niveau des océans (due à la fonte des calottes antarctique et groenlandaise, mais aussi à la dilatation thermique de l'eau des océans). Par exemple, Ben Santer, du laboratoire américain Lawrence-Livermore, et ses collègues ont montré en 2006 que dans les régions tropicales de l'Atlantique et du Pacifique, la température de surface de l'océan avait augmenté d'entre 0,3 et 0,6 °C au cours du xx^e siècle. L'accumulation de chaleur dans le système implique que les océans transfèrent davantage d'énergie à l'atmosphère. Or une hausse de 1 °C de la température de l'atmosphère permet une augmentation de 8% d'humidité dans l'air. C'est autant d'énergie supplémentaire disponible pour les cyclones. ➤

> Un océan plus chaud semble donc mener naturellement à des cyclones plus fréquents et plus intenses. Justement, ces dernières années ont été marquées par de nombreux cyclones exceptionnels. Le XXI^{e} siècle a déjà connu 14 ouragans de catégorie 5, près de la moitié du nombre observé sur la totalité du siècle précédent. Par exemple, les saisons cycloniques 2005 et 2020 ont battu des records en termes de nombre d'ouragans (la liste est allée jusqu'à « Epsilon » en 2005 et inclut notamment Katrina et Rita; la saison 2020, alors qu'elle n'est pas terminée, en était déjà à l'ouragan « Eta » au 1^{er} novembre). Ces dernières années ont aussi été marquées par des ouragans exceptionnels :

par exemple Haiyan en 2013, Patricia en 2015, Irma et Maria en 2017 ou Dorian en 2019 se sont distingués par l'intensité de leurs vents, et Harvey en 2017 a marqué les esprits avec ses pluies torrentielles. Ces cas récents renforcent l'impression que les cyclones destructeurs sont de plus en plus puissants et davantage fréquents. Pourtant, le lien entre l'intensification ou la fréquence des cyclones et le réchauffement climatique n'est pas aussi simple. L'augmentation de la température moyenne des océans ne modifie pas systématiquement à la hausse la fréquence et l'intensité des ouragans : l'année 2006 a, au contraire, été l'occasion d'une accalmie bienvenue.

UN MONDE SANS CYCLONES ?

Devant les destructions impressionnantes causées par les cyclones à travers le monde, certains scientifiques ont imaginé des stratégies pour les inhiber. L'énergie cinétique d'un cyclone moyen représente 10 000 fois celle libérée par la bombe atomique d'Hiroshima et dépasse même l'énergie de la bombe nucléaire la plus puissante jamais testée sur Terre. Une telle arme aurait donc peu de chances de détruire un cyclone, mais c'est pourtant l'idée saugrenue émise en 1945 par le maire de Miami de l'époque, Herbert Frink, au président Truman. Heureusement, cette piste ne fut pas poursuivie ! D'autres idées plus ou moins réalistes ont par la suite été envisagées. En 1966, les météorologues américains Joanne et Robert Simpson (de l'échelle Saffir-Simpson) ont proposé de recouvrir l'océan près d'un cyclone naissant d'une couche d'un fluide immiscible et plus léger, comme des hydrocarbures ou des huiles, afin d'empêcher l'évaporation. En 2005, Grigory Barenblatt et Alexandre Chorin, deux mathématiciens de l'université



L'équipe du projet *Stormfury* en 1966. L'avion était utilisé pour disperser de l'iodure d'argent afin de perturber la dynamique des cyclones. Le projet n'a pas été concluant.

de Californie à Berkeley, et un collègue ont repris cette idée en suggérant d'utiliser un tensioactif – la tension de surface étant nécessaire à la formation de gouttelettes à la surface de l'océan. Selon leur idée, empêcher la formation de ces gouttelettes faciliterait le développement de turbulences dans le vent qui inhiberaient à leur tour la formation du cyclone.

En 1976, des chercheurs de l'université d'État du Colorado ont proposé d'utiliser de la suie en grande quantité afin de perturber l'équilibre thermique du cyclone. La suie aurait été produite en brûlant des hydrocarbures en périphérie du cyclone...

Un autre projet a quant à lui été mené de façon très sérieuse par les États-Unis pendant dix ans, de 1961 à 1971 : le projet *Stormfury*. Il consistait à envoyer un avion traverser un cyclone

actif pour l'ensemencer d'iodure d'argent. Ce projet reposait sur l'idée que l'iodure d'argent servirait de graine pour amorcer la solidification de l'eau en surfusion et permettrait ainsi de modifier la structure du cyclone en libérant une partie de la chaleur latente de liquéfaction à l'extérieur du mur de l'œil. Il a été abandonné dans les années 1970 par manque de résultats.

Il y a une dizaine d'années, le projet *Salter Sink* visait à installer des pompes près des côtes menacées : ces pompes devaient exploiter l'énergie fournie par la houle pour injecter l'eau chaude de surface vers les profondeurs. Par mélange, cela aurait refroidi la surface de l'océan. Enfin, un projet récemment porté par la société norvégienne OceanTherm propose d'immerger des tuyaux percés au fond

de l'océan. En faisant circuler de l'air dans ceux-ci, on créerait un rideau de bulles qui entraînerait vers la surface les eaux froides des profondeurs. Comme dans le projet *Salter Sink*, l'objectif est ici de refroidir les eaux de surface afin de réduire l'énergie disponible pour les cyclones. Dans ces scénarios, le surplus d'énergie thermique emmagasiné en surface se trouverait absorbé par l'océan plutôt que par l'atmosphère... Les conséquences d'une telle modification des flux d'énergie restent à évaluer.

Depuis trente ans, les études théoriques et les simulations numériques prévoient que l'intensité des cyclones devrait augmenter, mais pas nécessairement leur fréquence. La question est restée longtemps débattue, car les données observationnelles et la précision des modèles étaient insuffisantes pour conclure. Il fallait d'une part disposer de résultats statistiquement robustes et d'autre part pouvoir corriger certains biais dans les données: la détection plus efficace de cyclones grâce à l'amélioration des techniques, une population plus importante exposée aux risques cycloniques, ou encore l'influence des oscillations naturelles du climat – des cycles quasi périodiques de variations locales de température de surface de la mer, de la température de l'atmosphère ou des précipitations, par exemple.

L'INFLUENCE D'EL NIÑO

Mais ces dernières années, les simulations numériques ont joué un grand rôle pour démêler ces phénomènes. Notamment, elles ont souligné l'importance des oscillations naturelles du climat. L'impact de ces oscillations, souvent localisées dans une région donnée, peut s'étendre à la planète entière en influant sur la circulation atmosphérique globale. La plus connue du grand public est probablement l'ENSO (El Niño Southern Oscillation) dans le Pacifique équatorial. Elle se traduit notamment par une oscillation de la température de surface de l'océan au large du Pérou: dans la phase El Niño, la température y est maximale, et c'est le contraire pendant la phase La Niña.

El Niño renforce les vents d'altitude qui soufflent au-dessus de l'Atlantique. Le phénomène de cisaillement associé à ces vents inhibe alors la formation d'ouragans. L'automne 2020, par exemple, est caractérisé par une phase La Niña: un faible cisaillement de vent a permis une saison cyclonique très intense dans l'Atlantique nord. Depuis quelques années, plusieurs organismes émettent des prévisions sur l'intensité d'une saison cyclonique en prenant en compte, entre autres, les oscillations naturelles du climat. Ils avaient ainsi anticipé la saison 2020, particulièrement active dans l'Atlantique nord.

La prise en compte de ces facteurs a permis d'affiner les modèles questionnant le lien entre changement climatique et cyclones. Dans trois études parues en 2020, Kerry Emanuel, l'équipe de Thomas Knutson, de l'université de Princeton, et celle de James Kossin, de la NOAA (l'agence nord-américaine de météorologie) ont confirmé que la hausse de la température moyenne n'augmente pas nécessairement la fréquence des cyclones tropicaux. En revanche, la fraction de cyclones les plus forts est plus élevée. À ce phénomène d'intensification s'ajoutent

Les prévisionnistes avaient anticipé une saison 2020 très active dans l'Atlantique nord

diverses évolutions confirmées ou encore débattues qui pourraient contribuer à rendre les cyclones plus destructeurs: la hausse du niveau des océans accroît les risques d'inondation, la saison cyclonique pourrait s'allonger, les cyclones pourraient ralentir...

Ce dernier point a été soulevé par James Kossin en 2018. En compilant des données acquises depuis la fin des années 1940, ce chercheur a suggéré que la vitesse moyenne de déplacement des cyclones avait diminué d'environ 10%. Ce ralentissement, s'il se confirme, implique qu'un cyclone déverse davantage d'eau et souffle plus longtemps à l'endroit où il rencontre la terre ferme. Les risques de crues augmentent et les vents forts infligent d'autant plus de dégâts. L'origine d'un tel ralentissement est encore mal comprise. Les liens entre les propriétés des cyclones et le climat sont loin d'être tous identifiés.

Devant un tel danger, il est évidemment tentant de chercher des solutions pour essayer d'empêcher la formation des cyclones, voire pour les détruire. Plusieurs approches ont déjà été envisagées (voir l'encadré ci-contre), pour l'instant sans grand succès. Outre les conséquences écologiques, parfois terribles, de certains de ces projets (il serait probablement difficile aujourd'hui d'envisager de répandre volontairement et massivement des hydrocarbures sur l'océan voire de l'iodure d'argent ou de la suie dans l'atmosphère), il convient de se demander: peut-on vraiment envisager une Terre sans cyclones?

Aussi loin que l'on remonte par des observations indirectes, les cyclones ont toujours frappé la Terre (certaines données semblent même indiquer qu'ils existaient déjà au Crétacé). Ils sont une partie intégrante du climat de notre planète, qu'ils contribuent à réguler: ils déplacent de grandes quantités d'énergie des océans surchauffés vers les latitudes plus élevées. Il est difficile d'estimer quelles seraient les conséquences sur le climat si un jour l'humanité arrivait à les contrôler. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Kossin et al., **Global increase in major tropical cyclone exceedance probability over the past four decades**, *PNAS*, vol. 117(22), pp. 11975-11980, 2020.

K. Emanuel, **Evidence that hurricanes are getting stronger**, *PNAS*, vol. 117(24), pp. 13194-13195, 2020.

T. Knutson et al., **Tropical cyclones and climate change assessment Part 1 et 2**, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 100(10), pp. 1987-2007, 2019 et vol. 101 (3), E303-322, 2020.

L. Oruba, et al., **Formation of eyes in large scale cyclonic vortices**, *Phys. Rev. Fluids*, vol. 3, pp. 13502-13520, 2018.

L. Oruba et al., **Eye formation in rotating convection**, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 812, pp. 890-904, 2017.

L. Oruba et al., **Rapid oceanic response to tropical cyclone Oli (2010) over the South Pacific**, *J. Phys. Oceanogr.*, vol. 47(2), pp. 471-483, 2017.

POUR LA SCIENCE

Édition française de Scientific American

**COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION
DÈS MAINTENANT !**



N° 517 (NOV. 20)
réf. PL517



N° 516 (Oct. 20)
réf. PL516



N° 515 (sept. 20)
réf. PL515



N° 514 (août 20)
réf. PL514



N° 513 (juill. 20)
réf. PL513



N° 512 (juin 20)
réf. PL512



N° 511 (mai 20)
réf. PL511



N° 510 (avril 20)
réf. PL510



N° 509 (mars 20)
réf. PL509



N° 508 (févr. 20)
réf. PL508



N° 507 (jan 20)
réf. PL507



N° 506 (déc. 19)
réf. PL506

À retourner accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Marketing – 170 bis boulevard du Montparnasse – 75 014 Paris – email : boutique@pouurlascience.fr



OUI, je commande des numéros de Pour la Science,
au tarif unitaire de 9,90 €.

1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES à 5 chiffres
correspondant aux numéros commandés :

1^{re} réf. _____ 01 x 9,90 € = 9,90 €
2^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
3^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
4^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
5^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €
6^e réf. _____ x 9,90 € = _____ €

TOTAL À RÉGLER _____ €

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris
Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

Offre valable jusqu'au 31/12/2020 en France Métropolitaine uniquement. Pour l'export, rendez-vous sur notre site internet boutique.pouurlascience.fr. Les prix affichés incluent les frais de port et les frais logistiques.
Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pouurlascience.fr.

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal _____ Ville : _____

Téléphone _____

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB) _____

Signature obligatoire :



RETROUVEZ TOUS LES ANCIENS NUMÉROS SUR
BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

La plateforme expérimentale Persée permet d'analyser les effluents d'iode gazeux dans les conditions représentatives d'un accident nucléaire.

L'iode radioactif volatil, un gaz à piéger

CONTEXTE

> Dans une centrale nucléaire, les réactions de fission des atomes d'uranium et de plutonium produisent aussi de l'iode radioactif, dangereux pour la santé s'il est inhalé ou ingéré. Or, si les systèmes actuels de filtration sont très performants pour piéger les aérosols d'iode, ils n'ont pas

été conçus pour piéger les formes gazeuses qui pourraient s'échapper de l'enceinte de confinement à la suite d'un accident. Depuis 2013, l'IRSN pilote un projet qui vise à trouver un matériau efficace pour filtrer ces iodes volatils et limiter de tels rejets.

Cahier partenaire
réalisé avec

IRSN

www.irsnn.fr

Les tests expérimentaux et la modélisation montrent qu'une zéolithe dopée à l'argent, un matériau poreux, présente de très bons atouts pour empêcher l'iode gazeux de s'échapper d'une centrale nucléaire en cas d'accident grave.

En cas d'accident sur un réacteur, l'un des risques majeurs pour la population environnante est qu'elle soit exposée à un rejet d'iode radioactif. En effet, inhalé ou ingéré, cet élément se fixe sur la thyroïde, glande essentielle à la régulation hormonale, et peut provoquer des cancers. Pour faire face à cette situation, selon le scénario de l'accident et sur ordre des autorités, il est préconisé à chaque personne susceptible d'être exposée d'ingérer un comprimé d'iode stable qui, en saturant la thyroïde, empêche l'iode radioactif de s'y fixer. Cette mesure s'accompagne d'une stratégie de mise à l'abri ou d'évacuation de la population, selon le degré de gravité de la situation.

« En cas de scénario grave, ces stratégies soulèvent diverses questions : quel est le moment le plus opportun pour prendre l'iode stable, combien de prises possibles, dans quel périmètre, etc. ? Une autre solution consiste à réduire au maximum ces rejets

d'iode radioactif. Nous cherchons donc à améliorer la sûreté des installations nucléaires dans ce sens », déclare Laurent Cantrel, chef du Laboratoire d'Expérimentation Environnement et Chimie à l'IRSN.

C'est d'abord tout le comportement de ce radioélément à l'intérieur de la centrale endommagée et dans les conditions extrêmes d'un accident grave (avec fusion du cœur) que se sont attachées à comprendre les équipes de l'IRSN depuis quinze ans.

L'iode-131 est produit lors de la fission de l'uranium et du plutonium. Il se trouve donc au départ au niveau des combustibles, au cœur du réacteur. Or, si un accident grave affecte un réacteur, les produits de fission sont en partie relâchés : ils transitent dans le système de refroidissement du circuit primaire, une partie s'y dépose, une autre gagne l'enceinte de confinement, ultime barrière avant un rejet potentiel. Les interactions chimiques au sein du réacteur pendant un accident sont complexes. Elles conduisent, entre autres, à la

>