

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

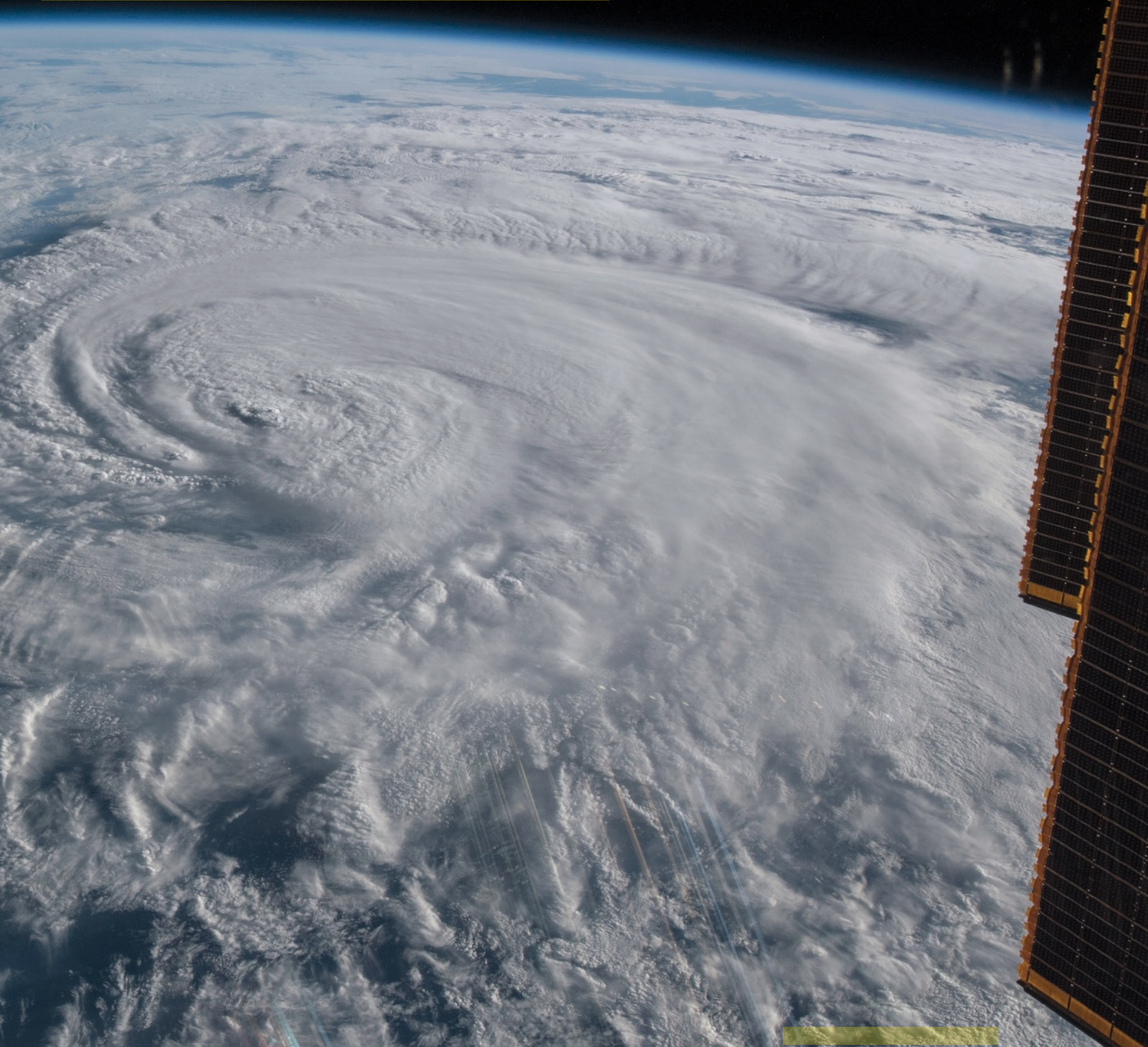


LUDIVINE ORUBA
maîtresse de conférences
à Sorbonne Université, au
Laboratoire atmosphères,
milieux et observations
spatiales, à Paris

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,