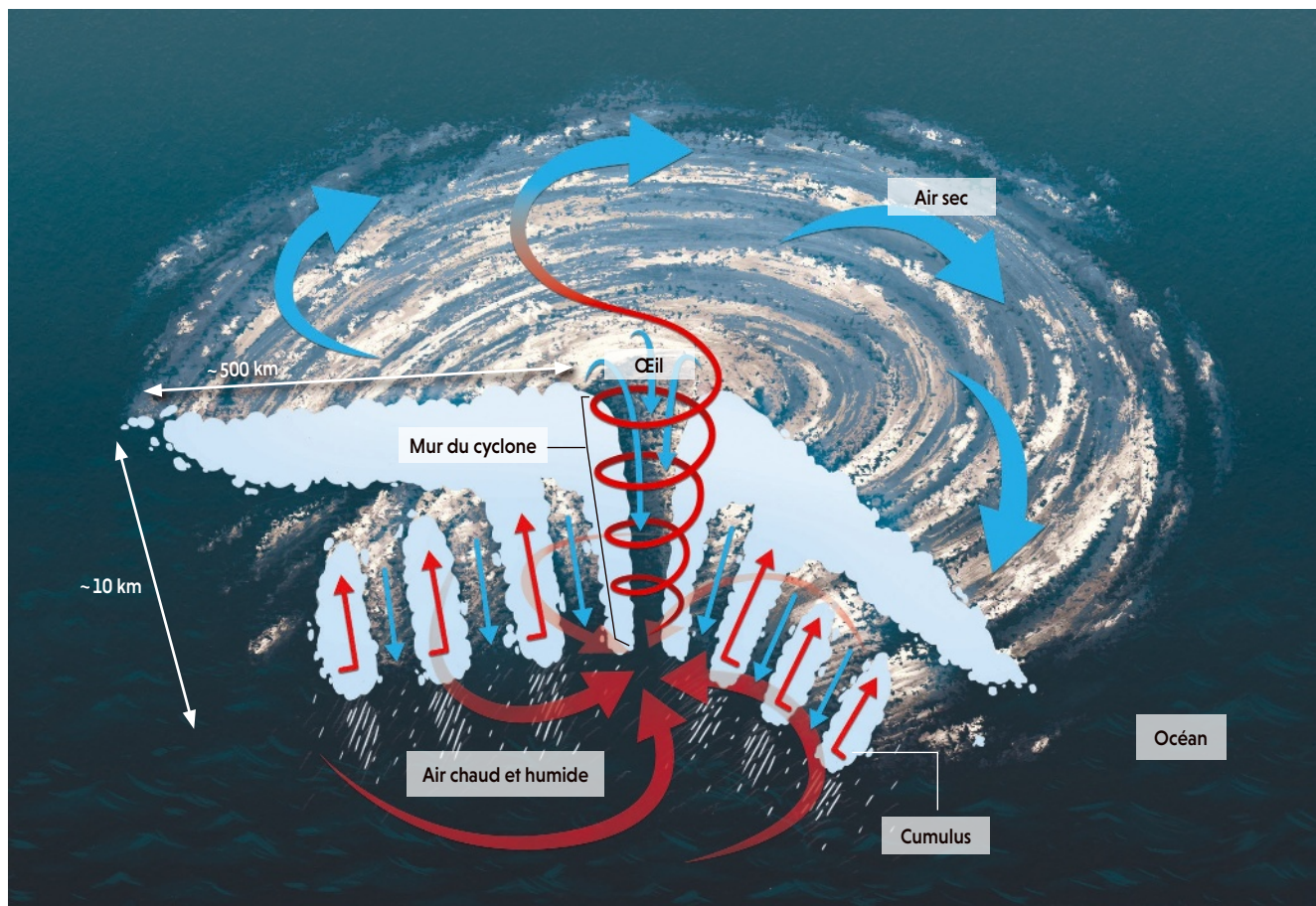




sur des épaisseurs allant de quelques mètres à près d'une centaine de mètres. Elle représente un formidable réservoir d'énergie susceptible d'être transmis à l'atmosphère.

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.

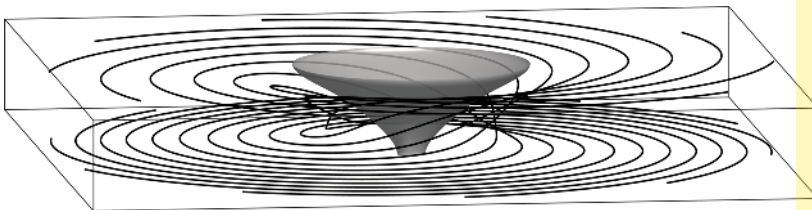
> sont invariantes par rotation dans l'espace. Pour la même raison que les patineurs tournent plus vite sur eux-mêmes lorsqu'ils ramènent les bras le long du corps, un mouvement résiduel de l'eau presque invisible à l'échelle du bain s'amplifie quand le liquide s'approche du siphon. La vitesse de rotation 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).

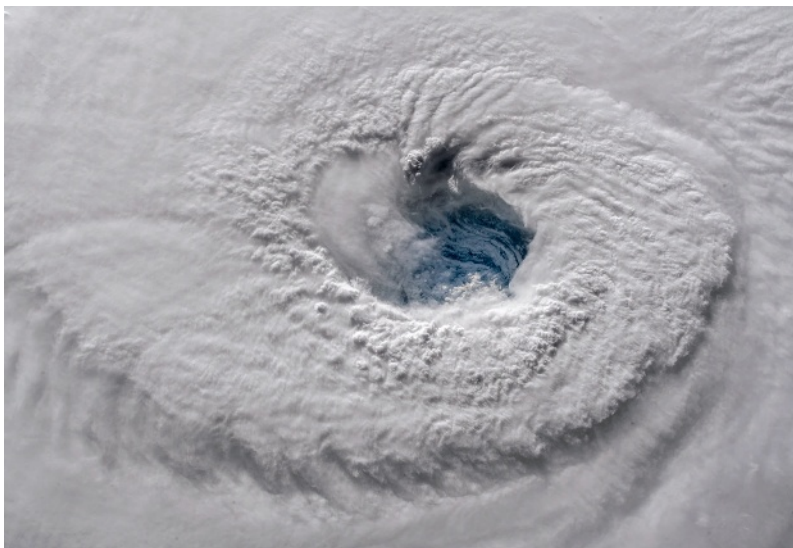


LA MORT D'UN CYCLONE

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. >



© 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.

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.

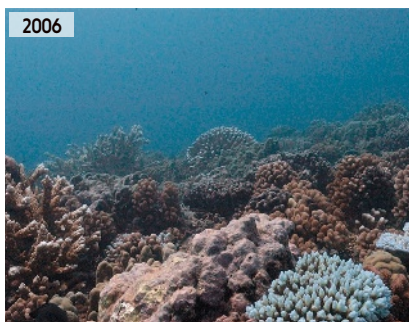
Dès les années 1960, les chercheurs ont essayé de comprendre les dessous du processus d'intensification qui permet de basculer du stade de tempête à celui du cyclone tropical. L'un des premiers mécanismes proposés, CISK, repose sur l'existence d'une convergence de vents à grande échelle vers le centre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

LA RÉSILIENCE DES CORAUX

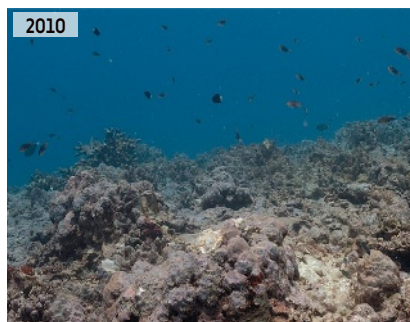
Les cyclones ne frappent pas uniquement les habitants et les infrastructures. Ils ont aussi un fort impact sur la nature. Par exemple, Yannick Chancerelle, du Centre de recherches insulaires et observatoire de l'environnement, a étudié l'impact sur les coraux du cyclone Oli, de catégorie 4, qui a frappé 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

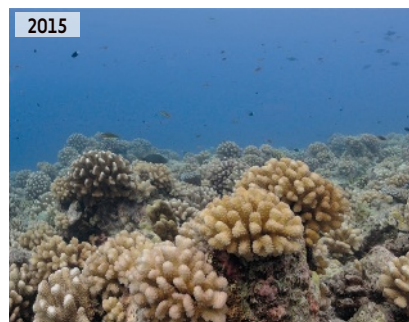
le passage d'Oli. On parle alors de résilience : on assiste à un véritable feu d'artifice de corail. Après ces prises de vues, ce récif a malheureusement connu un épisode de blanchiment majeur en 2019, probablement lié au réchauffement. Soumis à la pression anthropique directe (pollution des côtes), 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.



2006



2010



2015

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 reconstitués en quelques années.