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 mouvements 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. >

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.

> 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 XXIe 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 « Êta » au 1er 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 ?

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.

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 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.

© NOAA