



## L'énergie éolienne marine au péril des cyclones

**Bernard Dujardin**

Contrôleur général économique et financier (h), Capitaine de Vaisseau (h)

*La mer est l'avenir de l'énergie éolienne, loin des arrière-cours rurales, des campagnes et des littoraux de la France périphérique. Les zones économiques exclusives (ZEE) au-delà des eaux territoriales sont faites pour accueillir massivement des flotteurs surmontés de rotors aujourd'hui d'une puissance de 15 MW et demain d'une puissance double ou triple.*

**L**es eaux de la mer du Nord ne supporteront pas le nombre d'éoliennes que certaines perspectives à technologie constante projettent pour 2050. L'effet de sillage - le rotor au vent masque le rotor sous le vent - s'accroît avec la densité des implantations. Il réduit le facteur de charge potentiel sur une grande profondeur. L'Europe dispose avec ses régions ultrapériphériques insulaires tropicales de ZEE dont les superficies lui permettent de concourir à la construction de son indépendance énergétique. Sur ces espaces océaniques balayés par les vents réguliers des alizés, les facteurs de charge attendus s'établissent dans une fourchette 0,40 - 0,52. Sans usage dans les réseaux électriques des régions insulaires concernées, l'énergie éolienne est disponible pour produire des énergies de substitution aux énergies carbonées de la filière hydrogène H2, ammoniac NH3 et méthane de synthèse CH4 plus particulièrement.

Alors que l'éolien marin tropical se développe à terre, sur les littoraux ou posé sur des hauts-fonds dans les pays de l'Asie du Sud-Est soumis aux typhons, la France, premier État européen concerné par son patrimoine insulaire

créole, reste en arrière de la main par crainte des cyclones. La réponse à la question écrite en encart ci-dessous traduit cette « timidité ».

*« En ce qui concerne l'éolien en mer en Guadeloupe, le prédiagnostic réalisé en 2015 a mis en évidence 4 zones au sud-ouest de l'île pour lesquelles les contraintes d'installation d'une ferme éolienne en mer sont limitées. Cependant, la technologie à déployer dans ces zones où la bathymétrie est située entre 40 et 60 m ou 200 et 300 m serait plutôt l'éolien flottant, qui n'a pas encore atteint un stade commercial<sup>1</sup>. Quatre fermes pilotes d'éolien flottant ont été sélectionnées dans le cadre du programme d'investissement d'avenir (PIA) pour un déploiement en Méditerranée et dans l'Atlantique. Les retours d'expérience de ces fermes permettront d'alimenter les scénarios envisageables pour la Guadeloupe en matière d'éolien en mer. Les conditions météo-océaniques de la Guadeloupe et en particulier le risque cyclonique devront être prises en compte afin d'adapter les technologies développées en France métropolitaine. »*

Assemblée nationale : Réponse à la question écrite n°9559 du 19/06/2018, publiée le 11/12/2018

Rien n'a changé en quatre ans. L'exploitation éolienne des ZEE ultramarines n'est pas programmée. Le régime de l'obligation d'achat des fournitures d'énergies renouvelables intermittentes (EnRI) par les réseaux publics de distribution d'électricité ne tarife pas l'achat de l'éolien marin dans les zones non interconnectées (ZNI) et en conséquence dans celles qui sont exposées au risque cyclonique. Il ne concerne que les éoliennes implantées à terre. Le plan hydrogène n'évoque pas les régions ultrapériphériques comme gisements potentiels de production.

Les retours d'expérience sont à acquérir in situ et non pas à attendre de développements technologiques inadaptés<sup>2</sup>, non transférables dans les ZNI ultramarines. L'argument du risque cyclonique masque l'inaction et retarde la transition énergétique dans les eaux sous

souveraineté française en dépit de « l'urgence climatique » rappelée à satiété.

Le risque cyclonique est-il le point sensible de l'exploitation de l'énergie éolienne marine sous les tropiques ? Les cyclones, ouragans ou typhons sont des météores parfois très destructeurs. Tout comme les éruptions volcaniques, les secousses sismiques et leurs tsunamis associés, ils interpellent les médias au titre des quelques informations filtrant des territoires ultrapériphériques. La dramati-

1. Le parc éolien commercial Hywind fait d'éoliennes flottantes est opérationnel dans la ZEE de l'Écosse depuis l'automne 2017. L'administration le savait-elle ?

2. Le cahier des charges des 4 fermes pilotes d'éolien flottant du PIA s'arrête à maritimer les éoliennes terrestres et non à concevoir des éoliennes navales destinées à équiper les ZEE nationales. Cette approche est sociologiquement explicable. L'Histoire montre un mur difficile à franchir dans un pays à culture maritime réduite. Confer les avatars de l'hélice de Frédéric Sauvage au XIX<sup>e</sup> siècle et du transport maritime du gaz naturel liquéfié au XX<sup>e</sup>.



## Qualité éolienne de l'aérodynamique des alizés soufflant sur l'océan

Les alizés sont produits par la rotation de la Terre sur elle-même. L'énergie cinétique planétaire récupérable est générée par le différentiel de vitesse de rotation du globe et de son atmosphère en raison de la très faible viscosité dynamique de l'air. Elle est modulée au rythme semi-diurne de la force d'attraction du soleil : minimale au coucher et au lever du soleil, maximale à la méridienne. Elle évolue dans une fourchette de  $\pm 10\%$ .

La caractéristique aérodynamique propre au régime des alizés est un écoulement de l'air quasi laminaire. La couche limite planétaire en mer ouverte est d'une épaisseur du demi-kilomètre au-dessus du dioptré. Le grain de rugosité de la surface est de 0,2 mm. Le vent d'une vitesse mesurée au sol de 7,7 m/s est à 100 m d'altitude de 10,3 m/s. La « couche de surface », couche limite de turbulence atmosphérique, est de l'ordre de 50 m d'épaisseur. Les vortex s'y développent sur le plan vertical et non en gisement. La régularité azimutale du vent, autant que sa vitesse, est une qualité majeure reconnue pour la propulsion des navires et attendue pour la production d'énergie électrique.

sation de l'information amplifie le « ressenti d'un risque » à survenance exceptionnelle. L'incertitude impondérable que la menace fait peser sur la vie quotidienne pendant un semestre sur deux dans « les îles », génère des appels publics répétés à la prudence dès qu'une dépression naît à des milliers de kilomètres à l'est. Les populations locales vivent avec ce risque. Elles gardent leur sang-froid.

### Le cyclone, une spécialité tropicale ?

**A**fin d'évaluer l'obstacle au déploiement de l'éolien marin, une analyse de risque s'est employée à étudier le retour d'expérience de la Guadeloupe. L'Atlas des cyclones de la Guadeloupe de l'Amicale des Ouragans liste les cyclones et tempêtes tropicales qui ont frappé directement l'archipel et ceux qui en ont influencé la météorologie en passant à proximité pendant la période

de recensement (70 ans).

Tableau des cyclones frappant directement l'archipel de la Guadeloupe

Année	Date	Nom	Rafales maxi	Catégorie	Trace en Guadeloupe
1953	14/9	EDNA	185	Force 9	Vieux Fort/Bouillante
1956	11/8	BETSY	194	Classe 2	Canal des Saintes
1961	1/10	FRANCES	204	Force 10	Pte des Châteaux/Capesterre BE
1964	22/8	CLÉO	250	Classe 3	Marie galante/Basse Terre
1966	27/9	IÑES	241	Classe 3	Petit-Bourg/Pte-Noire
1974	29/8	CARMEN	241	Force 9	Pte de la Vigie
1981	8/9	GERT	167	Force 10	Canal des Saintes
1989	17/9	HUGO	259	Classe 4	Pte des Châteaux/Morne à l'Eau
1995	27/8	IRIS	176	Force 10	St François/Pte de la Vigie
1996	8/9	HORTENSE	222	Force 11	Goyave/Bouillante
2004	14/9	JEANNE	194	Force 9	St François/Deshaies
2009	2/9	ERIKA	83	Force 10	La Désirade/Ste Rose
2011	21/8	IRÈNE	194	Force 10	St François/Anse Bertrand
2012	13/10	ISAAC	130	Force 10	Marie galante/Les Saintes
2015	27/8	ERIKA	83	Force 10	Pte de la Vigie

À des fins de compréhension, les vents sont exprimés en km/h :

$1 \text{ kn} = 1,852 \text{ km/h} = 0,514 \text{ m/s}$ .

La colonne « Catégorie » se partage pour les vents de vitesse < 118 km/h en échelle Beaufort (chiffre précédé de « Force ») et  $\geq 118 \text{ km/h}$  en échelle Saffir-Simpson (chiffre précédé de « Classe »).

La vitesse maximale du vent sous rafale ne se confond pas avec celle du vent de la classe qui est la moyenne des vitesses maximales du vent en périphérie de l'œil du cyclone.

### Cercles de balayage des vents cycloniques

Équivalence en classe d'un ouragan passant à distance d'un territoire (*Community Hurricane Preparedness - Basics Structure*)

Cercle de la zone balayée par les vents d'un ouragan de classe n générant des vents cycloniques VCn : Ouragan de classe 1 : VC1 sur un cercle de 45 km de rayon.

Ouragan de classe 2 : VC2 sur un cercle de 45 km de rayon ; VC1 sur une couronne entre 45 km et 90 km.

Ouragan de classe 3 : VC3 sur un cercle de 50 km de rayon ; VC2 sur une couronne entre 50 km et 95 km ; VC1 sur une couronne entre 95 km et 140 km.

Ouragan de classe 4 : VC4 sur un cercle de 55 km de rayon ; VC3 sur une couronne entre 55 km et 100 km ; VC2 sur une couronne entre 100 km et 145 km ; VC1 sur une couronne entre 145 km et 190 km.

Ouragan de classe 5 : VC5 sur un cercle de 60 km de rayon ; VC4 sur une couronne entre 60 km et 105 km ; VC3 sur une couronne entre 105 km et 150 km ; VC2 sur une couronne entre 150 km et 195 km ; VC1 sur une couronne entre 195 km et 240 km.

La zone sur laquelle, du fait du passage d'un cyclone, soufflent des vents de force 11 à 8 (forte tempête, tempête, fort coup de vent, coup de vent), encore plus grande, s'étend jusqu'à près de 480 km de l'œil d'un ouragan de classe 5.

Tableau des météo influençant l'archipel de la Guadeloupe sans le frapper

Année	Date	Nom	Rafales maxi	Catégorie	Distance (km) au...	Point le plus proche	Équivalent catégorie
1950	21/8	BAKER	167	Classe 2	50	N de Pte de la Vigie	Force 11
1950	1/9	DOG	231	Classe 4	45	NE de la Désirade	Classe 4 et 3
1959	18/8	EDITH	93	Force 11	55	S du Vieux Fort	Force 10
1960	4/9	DONNA	231	Classe 3	90	NE de la Désirade	Classe 2 et 1
1963	26/10	HELENA	84	Force 9	25	S du Vieux Fort	Force 9
1966	26/8	FAITH	204	Classe 2	145	NE de Pte de la Vigie	Force 10
1973	3/9	CHRISTINE	111	Force 9	25	NE de Pte de la Vigie	Force 9
1979	29/8	DAVID	278	Classe 4	60	SSO du Vieux Fort	Classe 3 et 2
1979	3/9	FRÉDÉRIC	213	Force 11	85	NE de la Désirade	Force 9
1980	4/8	ALLEN	306	Classe 4	240	SSO du Vieux Fort	Force 11
1981	3/9	FLOYD	185	Force 9	25	NE de la Désirade	Force 9
1984	8/11	KLAUS	148	Classe 1	360	N de Pte de la Vigie	Force 7
1985	22/9	GLORIA	231	Classe 1	310	ENE de la Désirade	Force 7
1990	4/10	KLAUS	130	Classe 1	60	NE de la Désirade	Force 11
1995	5/9	LUIS	222	Classe 4	85	NNE de Pte de la Vigie	Classe 3 et 2
1995	14/9	MARILYN	185	Classe 1	10	SSO du Vieux Fort	Classe 1
1996	8/7	BERTHA	185	Classe 1	85	NNE de Pte de la Vigie	Force 11
1998	21/9	GEORGES	250	Classe 3	45	N de Pte de la Vigie	Classe 3 et 2
1999	20/10	JOSE	157	Classe 2	40	N de la Désirade	Classe 2 et 1
1999	20/11	LENNY	250	Force 11	55	ENE de la Désirade	Force 10
2007	17/8	DEAN	278	Classe 1	165	SSO du Vieux Fort	Force 9
2008	16/10	OMAR	213	Classe 3	315	NO de Ste Rose	Force 8
2010	30/8	EARL	231	Classe 2	155	NE de Pte de la Vigie	Force 9
2010	31/10	TOMAS	157	Classe 2	245	SSO du Vieux Fort	Force 7
2011	10/9	MARIA	130	Force 9	30	ENE de la Désirade	Force 9
2012	13/10	RAFAEL	148	Force 10	185	SO du Vieux Fort	Force 7
2014	13/10	GONZALO	231	Force 11	50	NE de la Désirade	Force 10
2017	5/9	IRMA	296	Classe 5	105	NE de Pte de la Vigie	Classe 3
2017	19/9	MARIA	278	Classe 4	30	S du Vieux Fort	Classe 4 et 3

La dernière colonne «Équivalent catégorie» exprime le niveau tempétueux en Guadeloupe d'un cyclone passant à distance de l'archipel. Cette colonne correspond à la colonne «Catégorie» du tableau précédent.





L'assomption du risque cyclonique dans la Caraïbe est à évaluer eu égard au risque tempétueux des 40 /50° N en Europe. En 70 ans, l'archipel guadeloupéen a connu 13 événements soit un tous les 5 ans 5 mois. Ceux-ci se répartissent par classe d'ouragan :

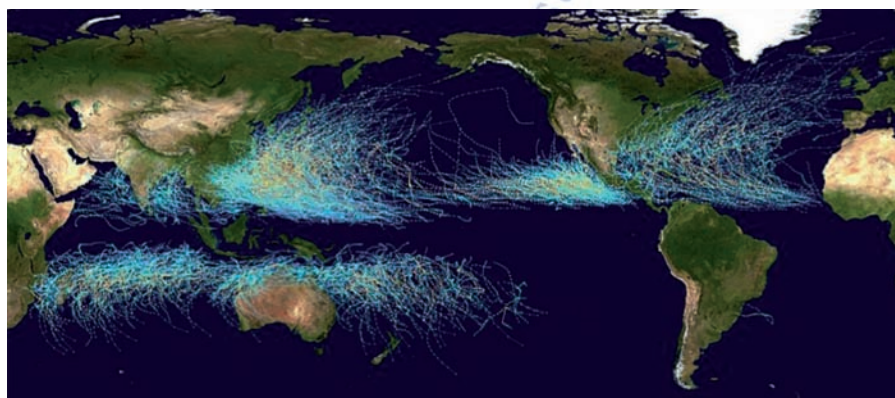
Ouragans classe	1	2	3	4	5
Traversant	0	1	2	1	0
À distance	1	2	4	2	0
Total = 13	1	3	6	3	0

Le cyclone Irma est de classe 4 quand il passe le 5 septembre 2017 à 120 km de la Grande Terre, y soufflant des vents d'un cyclone de classe 2. L'archipel guadeloupéen est placé en alerte rouge pendant une douzaine d'heures. Aucune victime et des dommages matériels limités à 8 000 foyers privés d'électricité et à certaines routes coupées. Les réseaux électriques, téléphoniques et routiers sont remis en état en 48 h. La trajectoire d'Irma (photo ci-contre), passe le 6 septembre, successivement sur Saint-Barthélémy et Saint-Martin alors qu'il est à son maximum (classe 5). Les îles du nord sont ravagées (11 morts à Saint-Martin). Le diamètre de l'œil fait 50 km.



DR

Les zones à risque ouragan sont portées sur la carte des trajectoires de tous les cyclones tropicaux qui se sont formés dans le Monde de 1985 à 2005<sup>3</sup> ci-dessous. Les points indiquent les emplacements des tempêtes à des intervalles de six heures et utilisent le schéma de couleurs de l'échelle des ouragans Saffir-Simpson :



DR



3. [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Global\\_tropical\\_cyclone\\_tracks-edit2.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Global_tropical_cyclone_tracks-edit2.jpg)

Cette carte montre une relativement moindre intensité en nombre et classe des cyclones de La Réunion, de la Nouvelle-Calédonie et des Antilles. L'innovation française en zone intertropicale cyclonique se résume à ce jour aux éoliennes terrestres rabattables de 0,1 à 0,5 MW. Une plus forte intensité des typhons dans les pays de l'Asie du Sud-Est, zone du Monde la plus vulnérable, Japon, Chine, Corée, Taiwan et Philippines est observée. Malgré le risque encouru, ces pays développent l'exploitation de l'énergie éolienne tant terrestre que posée en mer ou flottante par moyenne et grande profondeur.

Un cyclone se forme sous l'influence d'un gradient thermique vertical important de l'atmosphère qui naît à l'interface océan atmosphère. Conjugée à la présence d'un courant jet dans la haute troposphère, la convection provoque le passage d'une dynamique de type barocline à une dynamique de type barotrope caractéristique de la tempête tropicale. Sa circulation est soumise à la force de Coriolis liée à la rotation de la Terre et à sa sphéricité. Aux Antilles, la médiane des trajectoires cycloniques est orientée sur l'axe du rhumb O¼NO ; à la Réunion et en Nouvelle-Calédonie, sur l'axe du rhumb O¼SO. Dans l'hémisphère boréal, les vents cycloniques tournent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre autour de l'œil du cyclone, une oasis de calme trompeur. Ils lèvent des mers croisées dans le large sillage du météore. La vitesse de déplacement de l'ouragan ralentit les vitesses du vent au nord de la trajectoire et les accélère au sud<sup>4</sup>. Plus le cyclone est de classe élevée, plus il se déplace lentement. Les navigateurs échappent au risque cyclonique en prenant des routes de fuite adaptées eu égard à la position de l'œil et à sa trajectoire estimées.

L'Europe occidentale semble épargnée par les ouragans. Elle l'est par l'usage du vocabulaire. Il lui arrive d'en subir les foudres sans qu'ils ne soient désignés par leur nom. « *Mal nommer les choses c'est ajouter au malheur du monde.* » Quand le 26 décembre 1999, Lothar trace sa route sur le nord de l'hexagone, Albert Camus n'est plus là pour le désigner par le mot cyclone. Une justification de cette différence de vocabulaire qui n'en est pas une serait que le système tempétueux des latitudes tempérées 40° - 50° est causé par une dynamique de resserrement des isobares purement barocline. L'époque favorable à leur survenance s'étend de novembre à février (autour du solstice d'hiver boréal). Les tempêtes exceptionnelles naissent de dépressions marines générées par la circulation nord Atlantique qui se heurtent à un front anticyclonique immobilisé sur le continent eurosibérien. Après avoir ricoché sur la côte Est des États-Unis, les cyclones tropicaux peuvent accidentellement emprunter ce « gulf stream » et être le noyau d'un ouragan européen.

Sur les 25 « tempêtes majeures » survenues en métropole de 1980 à 2020, 9 sont identifiées comme ouragans<sup>5</sup>. Ils sont étalonnés sur l'échelle de l'indice de sévérité SSI (*Storm Severity Index*) alors que les ouragans tropicaux le sont sur

4. Et inversement dans l'hémisphère austral où les vents cycloniques tournent dans le sens des aiguilles d'une montre.

5. Météo France - caractérisation de la sévérité des tempêtes à : <http://tempetes.meteo.fr/spip.php?article205>



celle de Saffir-Simpson. Il n'est pas établi de table de correspondance entre les deux. L'indice SSI de Lothar est de 24,6, indice le plus élevé depuis la mise en place du SSI. En l'absence de moyen de corrélation, nous sous-estimons volontairement Lothar en l'assimilant à un cyclone de classe 3+.

En raison d'une prise au vent très supérieure à celle des régions d'outre-mer, l'hexagone subit l'assaut d'un ouragan tous les 4 ans 5 mois soit plus fréquemment. En métropole, les dommages causés par ces événements sont plus lourds. Ils peuvent notamment priver d'électricité plusieurs centaines de milliers de foyers. La question d'un différentiel de risque météorologique entre zone tempérée et zone tropicale n'est pas tranchée à ce jour. Seul le ressenti hexagonal préjuge sans le démontrer que plus un événement tempétueux exceptionnel est éloigné de la métropole plus il est dangereux. Cette conjecture est le produit d'une aberration d'optique commune aux lunettes d'observation utilisées par les médias pour voir loin. Augmentant la réalité, elles l'exagèrent.

## *Le réchauffement climatique va-t-il changer la donne ?*

Le rapport « Les événements météorologiques extrêmes dans un contexte de changement climatique » de l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC - 20 décembre 2018) s'ouvre par un mot du sénateur nantais Ronan Dantec : « *Les scientifiques nous disent aujourd'hui que la puissance de ces « super-cyclones » [Allen 1980<sup>6</sup>, Irma 2017], plus que leur nombre, peut être corrélée avec le réchauffement climatique en cours, les températures de l'eau et de l'air. Il est donc probable que ces phénomènes extrêmes se reproduisent, nous devons nous y préparer.* » Cette analyse politique présente la communauté scientifique dans son unanimité, corrélant le réchauffement climatique et l'existence d'une nouvelle classe de météore tropical, le « super-cyclone ». Le doute scientifique s'effacerait-il devant la vérité écologiste ? La question est-elle de rendre compte d'une réalité - domaine de la réflexion - ou de manifester par une inquiétude instinctive la nécessité d'étalonner son opinion sur les phénomènes extrêmes - domaine de l'émotion ? Le contenu éclairé du rapport ONERC conçu sous la direction de Laurent Michel, actuel directeur général de l'énergie et du climat, ne démontre pas la corrélation entre une plus grande puissance des cyclones et le réchauffement climatique mais la place dans l'ordre d'un putatif hésitant entre l'indémontrable et l'à-démontrer.

Le rapport ONERC applique une démarche scientifique : « *Sur l'Atlantique nord en particulier, l'activité cyclonique varie naturellement selon des cycles de plusieurs dizaines d'années. Avec un recul d'une quarantaine d'années seulement, il est impossible de distinguer l'impact du changement climatique de la variabilité naturelle du phénomène... En raison de l'incertitude sur l'amplitude*

6. Pourquoi l'auteur se réfère-t-il à ce cyclone ? En 1980, le réchauffement climatique n'était pas sensible. De classe 5, il est loin d'être le plus puissant de ces 50 dernières années. Il a pratiquement épargné la Martinique en passant sur Sainte-Lucie. Rien à voir avec David l'année précédente.

simulée du réchauffement océanique attendu dans les différents bassins, le GIEC n'accorde qu'un faible degré de confiance aux projections par région de la planète, tant en termes de fréquence que d'intensité des cyclones. Cela concerne les régions françaises des territoires d'outre-mer potentiellement exposées aux cyclones pour lesquelles il n'est pas possible de préciser ces évolutions futures. » Il ressort de ce constat qu'il est actuellement impossible de déterminer dans l'évolution de l'activité cyclonique la part du facteur anthropique et celle du facteur cosmique en raison de l'importance de la variabilité climatique naturelle<sup>7</sup> (cycles de Milankovitch).

Le rapport ajoute : « En outre-mer, les simulations du climat pour le XXI<sup>e</sup> siècle indiquent que les cyclones ne devraient pas être plus nombreux. En revanche, le nombre de cyclones de forte intensité devrait augmenter. » Ces simulations ne sont pas documentées<sup>8</sup>. Leur perméabilité à des biais ne peut être analysée. Les modélisations sont naturellement biaisées par un petit nombre de données pertinentes (built-in data bias) servant d'hypothèses aux projections. En l'absence de séries longues d'observations, il est impossible de revenir sur des périodes de temps limitées pour établir des conclusions opératoires. Alors qu'un phénomène progressif et permanent comme l'évolution du régime des vents sur une zone du globe est modélisable, le régime stochastique des événements cycloniques ne l'est pas, tout comme un événement géologique : séisme, tsunami ou éruption volcanique. Il est vain de prévoir la survenance d'un événement stochastique justement parce qu'il est stochastique. La dinde de Bertrand Russell ne prévoit pas le jour du Thanksgiving. L'Organisation mondiale de la santé n'a pas prévu le risque pandémique de la Covid19. Aucune simulation n'aurait été capable de le modéliser ex-ante. Il est tout juste possible de se préparer à un tel événement en stockant des masques pour une maladie respiratoire contagieuse dès lors que le coût en est très inférieur à celui probable d'une pandémie. L'extrait du « Tableau 16 – Impacts de cyclones survenus au cours des 60 dernières années dans différents outre-mer » (page 163 du rapport ONERC) comptabilise les dégâts humains survenus durant cette période dans les 3 départements créoles :

Guadeloupe décès	1989 Hugo 7			
Martinique décès	1970 Dorothy 44	1979 David 30	2001 Iris 3	2007 Dean 0
Réunion décès	1948 165	1980 Hyacinthe 25	1989 Firinga 4	2002 Dina 0

Il ne faut pas tirer de ce tableau la conclusion hâtive que les cyclones sont de nos jours moins nombreux et moins dangereux (ou l'inverse). Il illustre seulement les progrès faits en matière de détection précoce des cyclones et d'efficacité des mesures de prévention prises. Il est le résultat également de la

7. Source : Rapport GIEC 2013

8. Selon le nombre, la nature et les algorithmes des extrapolations tendanciennes, les simulations donnent des résultats divergents. Aucune prévision par la simulation qui a décidé des travaux de rétablissement du caractère maritime du Mont-Saint-Michel, ne se réalise. La baie sensible toujours plus vite et le Couesnon en sa folie s'est échappé du Mont.





croissance du PNB par tête qui a développé un habitat résistant aux vents, pluies et submersions cycloniques. Ce n'est pas le cas de l'habitat de Saint-Martin touché par Irma en 2017. Les dégâts causés par des cyclones exceptionnels d'égale violence varient avec le temps pour des causes anthropiques sans rapport avec le climat. Les pertes en vies humaines croissent en valeur absolue avec la croissance de la population mondiale, multipliée par 3,4 entre 1940 et 2020, mais moins rapidement en valeur relative en raison de la croissance économique. Le coût estimé des destructions matérielles sur les massifs forestiers, sur les cultures, sur les réseaux de transport et de communication et en milieu urbain est plus élevé pour 1 000 habitants dans les pays riches que dans les pays pauvres. Elles concernent des biens d'une valeur plus élevée. En son état actuel, la science météorologique confirme que l'incidence d'une variation climatique de température de l'atmosphère terrestre est indétectable sur l'activité cyclonique tropicale.

Le gradient thermique vertical est une différentielle dont la valeur qualifie l'état de perturbation cyclonique ou non de l'atmosphère. Quand la valeur absolue de la température de l'atmosphère s'accroît globalement du fait du réchauffement climatique,

## Savoir raison garder<sup>9</sup>

Météo France : Cyclones et changement climatique  
*Encore beaucoup d'incertitudes*

Le cinquième rapport du Giec a mis en évidence la complexité des facteurs qui peuvent influencer sur le développement et le cycle de vie des cyclones tropicaux mais aucune conclusion définitive n'a pu être tirée. L'impact des aérosols anthropiques sur l'activité cyclonique, notamment, fait l'objet de nombreux travaux scientifiques, mais leurs effets sont complexes à mettre à jour.

*Les recherches menées à Météo-France*

Météo-France a mené une étude sur la répartition des cyclones dans l'Atlantique nord au cours des prochaines décennies. Les résultats révèlent, pour la seconde moitié du XXI<sup>e</sup> siècle, un décalage de l'activité cyclonique vers le nord, qui rendrait la mer des Caraïbes et le golfe du Mexique plus paisibles au détriment de la côte est des États-Unis. Cette étude n'a pas permis, pour l'instant, de préciser les causes de ce décalage. Il semblerait toutefois que la partie est du bassin Atlantique, où les systèmes précipitants liés à la mousson quittent l'Afrique, soit une zone clef à surveiller. Bien que des études menées par d'autres groupes de recherche dans le monde commencent à montrer des résultats similaires, les climatologues manquent encore de recul pour confirmer cette tendance.

- Primo, la masse d'eau évaporée des espaces océaniques augmente. Plus d'évaporation provoque *a priori* plus de précipitations. Toutefois, l'atmosphère stocke plus de vapeur d'eau : la pression de vapeur saturante que peut contenir l'air s'accroît avec la température. Le GIEC observe en 2013 que la masse de ce stockage supplémentaire reste inférieure à la masse supplémentaire d'eau évaporée. En conséquence, la superficie du globe où le taux d'humidité relative de l'air atteint le seuil de saturation de 100%, croît, d'où plus de précipitations réparties sur une plus grande surface. Aucune incidence sur les cyclones : quelle que soit leur température, le taux d'humidité de l'atmosphère des masses d'air cycloniques est et sera de 100%. Le réchauffement climatique ne change pas la donne.

- Secundo, la différentielle du gradient thermique d'un cyclone est une constante. Les valeurs absolues des tem-

9. Source : <https://meteofrance.com/le-changement-climatique/observer-le-changement-climatique/cyclones-et-changement-climatique>

pératures en jeu évoluent avec le réchauffement climatique sans modification de leur distribution relative. Du fait de cet invariant, l'énergie contenue reste la même. La puissance du cyclone n'est pas impactée par la croissance en valeur absolue de la température du globe. Elle reste étroitement liée à un resserrement plus ou moins exceptionnel des isobares générant des vents d'une violence plus ou moins extrême.

« L'idée d'accroître la sensibilisation de la population aux conséquences du changement climatique en s'appuyant sur l'analyse de situations vécues récentes » est une fausse bonne idée en matière de cyclones tropicaux dans l'état actuel des connaissances scientifiques, sauf à vouloir inutilement susciter une atmosphère d'inquiétude structurelle dans les régions concernées. Victor Hugo disait : « Dans ce moment de panique, je n'ai peur que de ceux qui ont peur. »

### Le retour d'expérience

Même, d'un niveau inférieur à celui d'un ouragan, les tempêtes abattent à l'occasion des éoliennes. Le retour d'expériences français est limité. En Nouvelle-Calédonie, le 1<sup>er</sup> mars 2003, le cyclone *Erica* dévaste la moitié d'un parc de 8 éoliennes de la société Électricité et Eau de Calédonie situé sur la commune du Mont Dore où sont enregistrées des rafales à 227 km/h à la Montagne des Sources. Ces éoliennes terrestres ne sont ni rabattables ni orientables dans le vent. Ce type d'accident existe également en métropole. Loin d'être exceptionnelle, avec des rafales limitées à 133 km/h, la tempête Carmen du 1<sup>er</sup> janvier 2018 sectionne à la base, à Bouin en Vendée, une éolienne terrestre littorale de 62 m de haut. Une demi-douzaine d'accidents comparables plus ou moins spectaculaires est recensée à l'intérieur des terres.

La Chine est un pays en avance sur la France dans l'exploitation littorale de l'énergie des vents marins. La communication « *Structural integrity of wind turbines impacted by tropical cyclones : A case study from China*<sup>10</sup> » tire le retour d'expérience des destructions occasionnées par deux typhons de classe 4 (septembre 2003) et 4+ (septembre 2013). Ils frappent à dix ans d'intervalle le même parc éolien de Guangdong-Honghaiwan, implanté sur le littoral terrestre de la baie de Honghai en mer de Chine méridionale par 23° N, équipé de générateurs Vestas de 0,66 MW de puissance crête :

« Le développement de l'énergie éolienne offshore devrait s'accélérer en Chine dans les années à venir [après 2016, date de publication] selon la récente planification gouvernementale. Il est urgent d'acquérir une compréhension approfondie de l'intégrité structurelle des éoliennes dans des conditions de vent extrêmes.

En alerte typhon, les éoliennes sont placées en état d'arrêt d'urgence : les systèmes de contrôle du lacet et du tangage sont verrouillés ; les freins à disque sont engagés. Les défaillances structurelles sont analysées par éléments finis [méthode de la mécanique des fluides numériques]. Les éoliennes situées sous le vent sont soumises

10. © Xiao Chen, Chuanfeng Li, Jing Tang – 2016 – © Traduction Century Flyer - 2021.



à une vitesse de vent relativement faible de  $V_{hub} = 62,2 \text{ m/s}$  [224 km/h]. Lorsque les 3 pales sont mises en drapeau, la pale supérieure s'avère capable de survivre au vent extrême [soufflant plus fort au-dessus du moyeu (hub)] ; elle est conçue pour résister à une vitesse de survie de  $70 \text{ m/s}$  [252 km/h]. Toutes les poussées de vent appliquées sur les pales sont transférées et supportées par la tour, d'où un risque élevé de son effondrement. En revanche, pour les éoliennes situées au vent, la vitesse maximale du vent de  $V_{hub}=68,2 \text{ m/s}$  [246 km/h] est très proche de la vitesse de survie de conception des pales, conduisant à la rupture de la pale supérieure. Lorsque cette rupture intervient, les poussées de vent appliquées à l'éolienne sont considérablement réduites en raison de la perte de section [70%] de la pale. En conséquence, la tour survit au vent fort.

Les calculs coïncident avec la distribution des défaillances structurelles observées dans le parc éolien, selon lesquelles la plupart des effondrements de tours se trouvent sous le vent avec une vitesse du vent plus faible tandis que la plupart des ruptures de pales se trouvent au vent avec une vitesse de vent plus élevée.

À supposer que la pale supérieure soit libre de changer de pas en raison d'un dysfonctionnement du contrôle du pas, aucune défaillance structurelle ne se produirait quelle que soit l'orientation en lacet du rotor. Dès lors que la pale supérieure mise en girouette supporte des poussées de vent insignifiantes, celles qui s'appliquent à la tour sont réduites.

La défaillance du contrôle de pas des pales joue donc un rôle protecteur de l'éolienne en raison de la réduction des poussées extrêmes de vent appliquées à la tour. Son effondrement entraîne une destruction totale de l'éolienne. Bien que les éoliennes soient conçues pour survivre à des conditions de vent extrêmes, lorsque les conditions de vent réelles dépassent le seuil de survie retenu à la conception, une défaillance structurelle est inévitable. Dans de telles circonstances au demeurant rares, choisir « le moindre mal » réduira la perte totale. La pale et la tour sont deux composants structurels majeurs d'une éolienne. La rupture de la pale est « le moindre mal » en comparaison de l'effondrement de la tour. En conséquence, quand un risque élevé de défaillance structurelle survient lors d'un épisode cyclonique de classe 5, le contrôle de pas des pales de rotor doit pouvoir être débrayé et la mise en drapeau neutralisée. Dans la norme de conception éolienne 2016 de la Commission électrotechnique internationale (CEI), la tour tubulaire et la pale de rotor sont traitées à l'identique comme des composants structurels « à sécurité non intégrée » avec le même facteur de sécurité partiel  $\gamma_n = 1,0$ . Cette norme considère la rupture de la pale et l'effondrement de la tour comme d'égale importance. Or, l'effondrement de la tour provoque la perte totale de l'éolienne au lieu de la seule rupture de la pale. Il est suggéré que la résistance de la tour soit prioritaire sur la résistance de la pale et que son facteur de sécurité partiel  $n$  soit supérieur, au lieu d'être égal à celui des pales de rotor. »

Observation : L'état d'arrêt d'urgence prévu pour le parc éolien de Guangdong Honghaiwan verrouillait le système de contrôle du lacet. Les rotors arrêtés, pales en drapeau, ne s'orientaient pas face au vent instantané. Les dégâts sont constatés pour un axe de rotor à 6 rhumbs de celui du vent. Sur 33 éoliennes, les ruptures de pales en concernent 24 dont 13 par effondrement du mât (destruction totale).

Les éoliennes terrestres, autres que les implantations sur un plateau dégagé, sont paradoxalement plus vulnérables à des vents plus faibles qu'en mer : leur pose soit dans les couloirs de vallées à effet venturi, soit sur des crêtes aux flux d'air ascendants, offre un facteur de charge plus élevé, mais augmente la vulnérabilité aux turbulences causées par le relief.

Les accidents d'éoliennes terrestres en cas de vent extrême montrent deux points de faiblesse : les pales se fracturent à une distance du moyeu située aux 3/10<sup>e</sup> de leur longueur ; le mât tour est sectionné sur une ligne de soudure au cinquième de la hauteur hors sol. Aucun retour d'expérience sur les éoliennes posées en mer n'est publié à ce jour. Le BEA-mer – compétent a priori pour les futurs accidents d'éoliennes flottantes – devra être qualifié pour tirer les leçons des avaries exceptionnelles de ces éoliennes dès lors qu'elles seront opérationnelles dans les eaux françaises.

Le code des assurances depuis la loi du 20 juin 2016 pour l'économie bleue place « les installations d'énergies marines renouvelables » dans la catégorie des grands risques. Leurs polices doivent couvrir les risques de catastrophes naturelles sans intervention des finances publiques. Outre-mer, les compagnies d'assurance, en l'absence de recul statistique, majorent le coût des polices des exploitants d'éoliennes tropicales, obéissant à la doctrine des arts marins du « trop fort n'a jamais manqué ». Les tarifs d'assurances sont établis selon la classe des matériels. Les sociétés de classification arrêtent au début des années 2010, les normes à respecter pour soutenir les vents violents des ouragans. En 2015, la société de classification DNV-GL certifie le premier rotor résistant à un ouragan de classe 4 : un aérogénérateur de 5/6 MW sur nacelle tournante, destiné à un parc éolien posé aux Philippines.

### *Le régime administratif de l'éolien exposé au risque cyclonique*

L'arrêté du 17 novembre 2008 fixe les tarifs d'achat obligé de l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie mécanique du vent. Il majore d'un tiers ceux applicables aux régions d'outre-mer sans motivation ni condition. L'arrêté du 8 mars 2013 fixe les conditions (conditions tarifaires et techniques) d'achat de l'électricité produite par les installations utilisant l'énergie mécanique du vent, situées dans des zones particulièrement exposées au risque cyclonique qui motivent un tarif plus que doublé. Cet argument est le produit d'un réflexe administratif apparent de justification : « À danger cyclonique exceptionnel, régime dérogatoire » et d'un autre réel, l'insuffisance d'une majoration du tarif métropolitain du tiers pour attirer les investisseurs. La motivation cyclonique n'est pas étayée par une analyse de risque. Le bouc émissaire météorologique masque une motivation politique. Est-ce dévoiler un secret que de révéler que le risque capitalistique d'un investissement est plus élevé dans une région ultrapériphérique que dans une région métropolitaine ? Compenser ce risque non-dit est coûteux pour le consommateur. L'arrêté du 12 février 2021 modifie l'arrêté du 8 mars 2013 en rabotant l'effet d'aubaine. Cette baisse sem-





ble avoir été proposée par le régulateur en appliquant une règle de trois à celle du coût moyen de l'éolien terrestre des dix dernières années. La question se pose de savoir si elle ne va pas arrêter tout investissement dans le secteur.

Nb d'heures/an	Arrêté 2008	Arrêté 2013		Arrêté 2021	
	ans N1 à N15	ans N1 à N10	ans N11 à N15	ans N1 à N10	ans N11 à N20
<= 2600 h	110 €/MWh	230 €/MWh	230 €/MWh	120 €/MWh	120 €/MWh
> 2600 h et <= 3200 h	110 €/MWh	230 €/MWh	Interpolation	120 €/MWh	Interpolation
> 3200 h	110 €/MWh	230 €/MWh	50 €/MWh	120 €/MWh	70 €/MWh

Les heures seuil sont des équivalents heures de production à puissance crête (Puissance / Énergie<sub>an</sub>). « *Le productible de 2600 h constitue une valeur basse pour la Guadeloupe et une valeur moyenne pour la Martinique et a donc été retenu pour l'analyse du tarif. En revanche, cette hypothèse est sans doute élevée pour La Réunion ou les régimes de vent sont moins favorables.*<sup>11</sup> » L'arrêté de 2021 prolonge la période d'achat obligé de 5 ans. La couverture du risque cyclonique passe de 15 à 20 ans. Ces durées d'exploitation sans souci de commercialisation sont en fait glissantes : « *Peuvent bénéficier plusieurs fois d'un contrat d'obligation d'achat : les installations [éoliennes], situées dans les zones non interconnectées au réseau métropolitain continental.*<sup>12</sup> » Ces mesures de prolongation d'exploitation des éoliennes sont-elles prises en raison de la révision implicite de l'évaluation du risque cyclonique ? Ou sont-elles le fruit d'un compromis suite à un « travail de concertation » avec la profession ?

L'arrêté du 8 mars 2013 conditionne son tarif aux éoliennes « *équipées de dispositifs anticycloniques permettant notamment d'arrimer au sol les éléments les plus sensibles.* » L'arrêté du 12 février 2021 reprend cette condition<sup>13</sup>.

Une illustration de l'application de cette réglementation est le parc éolien littoral de Sainte-Rose Énergie mis en service en 2019 : l'investissement de 50 M€ porte sur 16 MW répartis en 8 rotors de 2 MW<sup>14</sup>. Le modèle est typique des implantations métropolitaines des années 2015. L'opérateur table sur 2 060 heures par an d'exploitation à la puissance crête. L'effet d'aubaine cyclonique génère un chiffre d'affaires égal à 14 fois le coût en capital avec un coût de fonctionnement sur 15 ans inférieur à une fois le coût en capital<sup>15</sup>. Il est caractérisé par la ligne 2013 du tableau suivant :

Arrêté	Puissance	Facteur de charge	Production	CA annuel M€	Durée de vie ans	CA total garanti M€
2013	16 MW	0,325	33 GWh	47,38	15	710,7
2021			en 2 060 h	24,72	20	494,4

11. *Délibération de la Commission de régulation de l'énergie du 1er octobre 2020.*

12. *Article L314-2 du code de l'énergie.*

13. *Rédaction : application du tarif aux éoliennes qui « présentent une conception adaptée aux régimes de vent cyclonique permettant notamment d'arrimer au sol les éléments les plus sensibles ».*

14. *Sa capacité crête de 16 MW représente 62% de la capacité éolienne totale installée en Guadeloupe. Le parc de la Désirade Montagne est le premier parc éolien installé en France en 1992 avec 35 éoliennes de 60 kW (2,1 MW).*

15. *L'ADEME présente les énergies renouvelables intermittentes comme des énergies à coût marginal nul.*

Or les éoliennes de ce parc à la différence des traditions ultramarines, ne « *présentent [pas] une conception adaptée aux régimes de vent cyclonique permettant notamment d'arrimer au sol les éléments les plus sensibles* ». Le commissaire enquêteur écrit : « *Les pales et la nacelle d'une éolienne s'orientent en permanence face au vent grâce à un moteur commandé par un ordinateur, propre à chaque éolienne. En cas de déconnexion au réseau, ce qui est fréquent lors des cyclones, un générateur électrique s'active : l'éolienne peut rester alimentée et continuer à orienter ses pales et sa nacelle. Elle réduit ainsi ses charges mécaniques et peut résister aux vents violents. D'une hauteur de 123 m en bout de pale, ces éoliennes non rabattables sont les premières à être installées dans les Antilles françaises !<sup>16</sup>* »

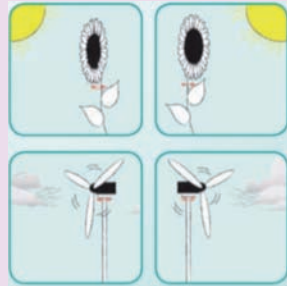
Le dispositif n'est pas à proprement parler « *adapté aux régimes de vent cyclonique* ». L'alimentation de secours pour orienter le rotor face au vent est commune aux éoliennes terrestres et posées en mer en Europe du nord. Il n'a pas à ce jour été en mesure de révéler ses qualités anticycloniques. La condition d'arrimage au sol n'est pas respectée. « *Le directeur général de l'énergie et du climat chargé de l'exécution du présent arrêté* » ne s'en inquiète pas. La condition est une figure de style.

### Communication illustrée de l'opérateur vue sur le site du parc éolien de Sainte Rose<sup>17</sup>

« *Conçues pour résister aux cyclones, ces éoliennes à 3 pales sont les premières de ce type en Guadeloupe. En restant alimentées en électricité pendant les cyclones, elles s'orientent en permanence face au vent et résistent ainsi aux vents forts... Comme un tournesol qui suivrait la course du soleil.* »

Cette publication est représentative de l'environnement médiatique des énergies renouvelables. Le ciel du cyclone (?) est clément, le tournesol une plante rassurante. Le vent tourne. Le rotor continue à tourner.

La vitesse du vent reste donc inférieure à 90 km/h, vitesse limite supérieure de génération électrique. Les vents d'un cyclone réel commencent à 110 km/h, le rotor est alors mis à l'arrêt et les pales en drapeau. Un cyclone, ça ne se montre pas. Ça ferait peur.



Éolienne orientable  
© Agence Corallia

### Résilience des éoliennes marines aux cyclones

L'éolienne posée en mer a les mêmes points de faiblesse que l'éolienne terrestre et les mêmes conditions de mise en alerte cyclone. L'éolienne flottante améliore les mesures de sauvegarde. Sa très grande raideur à la gîte, la vertu du chêne, est indispensable pour travailler dans les meilleures conditions afin d'éviter les vibrations. Le *Single Point Anchored Reservoir* (SPAR),

16. Enquête publique n° E14000011/97 du 20 octobre au 20 novembre 2014 de M<sup>me</sup> Ruddyse Girard.

17. <http://www.valorem-energie.com/blog-sainterose/category/projet-dev/1-4-les-caractéristiques-du-projet/>



seul flotteur technologiquement mature et opérationnel actuellement, possède une très grande distance métacentrique. Il est quasi aussi raide qu'une éolienne posée. Ce flotteur est pratiquement insensible tant aux mers courtes éventuellement déferlantes qu'aux longues houles. Son ballast permet de réduire la distance métacentrique à la demande : la vertu du roseau résiste mieux aux vents les plus puissants. Placer en état d'arrêt d'urgence sous menace cyclonique une éolienne flottante consiste à mettre en œuvre les mesures de sauvegarde préventives suivantes :

- piloter en lacet<sup>18</sup> le flotteur pour orienter le rotor solidaire dans le vent comme un navire à l'ancre à la différence près qu'il n'est pas soumis aux courants marins du fait de sa carène cylindrique ;
- diminuer la stabilité du flotteur par réduction de la distance métacentrique en pompant le ballast<sup>19</sup> dans un réservoir à carène liquide libre au plus près de la nacelle ;
- freiner le rotor et le saisir en position Y inversé ;
- mettre en drapeau les pales du rotor ou mieux, débrayer le système de contrôle de pas de la pale supérieure voire des trois pales.

La vulnérabilité des éoliennes flottantes est leur « tenue de poste » dès lors qu'elles sont soumises à une mer forte et à des rafales de vent violentes. Le risque spécifique est celui d'une rupture des lignes de mouillage et d'un dérapage en dérive. Il est plus élevé par petit fond à l'intérieur de l'isobathe des 300 m. L'agitation de surface soumet alors le flotteur à un rappel brutal et répété sur la ligne en tension le reliant au corps-mort. Un positionnement avec le rayon d'évitage le plus faible possible demande un mouillage basé sur 6 lignes d'ancrage en fibre synthétique à l'exemple de celui de l'éolienne Floatgen au Croisic. En revanche, les fixations abyssales pratiquées dans l'industrie offshore à grande profondeur résistent mieux aux mers et vents extrêmes. Elles assurent la tenue de poste au moyen de lignes semi-tendues frappées sur des corps-morts « vissés » dans plusieurs mètres du sous-sol marin (et non sur des ancres relevables). L'élasticité des lignes kilométriques neutralise le rappel des vagues en surface. Au-delà de 500 m de profondeur, deux lignes en back-up l'une de l'autre tiennent une éolienne flottante à poste sur une ellipse d'évitage de 50 par 100 m<sup>20</sup>. Leur point de rappel est fixé sur les organes d'une couronne rotative cerclant l'éolienne au niveau de son centre de gravité.

18. Le système de contrôle du lacet est piloté par une assistance dynamique, celui du tangage par ballast ou lest mobile.

19. Le ballast d'une éolienne flottante est à tonnage constant. Il est équivalent à un lest mobile. En exploitation, l'effet de carène liquide est neutralisé par construction.

20. Les éoliennes flottantes sont réparties en lignes, perpendiculairement à la direction moyenne de l'alizé, à ~ 400 m de distance les unes des autres, lignes elles-mêmes espacées de 5 000 m pour neutraliser l'effet de sillage.

Ce tableau résume les différences de résilience aux cyclones des 3 types d'éoliennes :

Éolienne	Nacelle	Girouette	Turbulences	Effet Venturi	Raideur	Risque ancrage
Terrestre	Orientable en lacet et tangage	Nacelle motorisée	Vortex relief	Topographique	Immobilière	Sismique
Posée en mer			Vortex limité	Marginal		Sismique
Flottante par fond > 200 m	Solidaire du flotteur	Flotteur à rotation assistée	au sillage des éoliennes	Inexistant en mer ouverte	Variable avec ballast mobile	Violence des éléments

La résilience des pales une fois orientées face au vent est comparable. Elle est toutefois supérieure sur l'éolienne flottante si celle-ci prend une gîte  $\geq 5^\circ$  sous le vent d'une rafale.

Le risque cyclonique concerne également les *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO) à la fois sous-station chargée de collecter l'énergie électrique produite par le parc éolien et de la convertir par électrolyse de l'eau en énergies stockables et transportables : hydrogène puis ammoniac. Leur résistance à un passage de cyclone relève d'un problème naval maîtrisé.

### Conclusion

« **L**e pire n'est pas toujours sûr. » Paul Claudel n'avait pas eu l'occasion de vivre des cyclones de classe 5. Par leur intensité et en dépit de leur rareté, ils sont en mesure d'infliger des dégâts aux parcs éoliens marins des tropiques. Un cas d'école, le programme antillais Guadeloupe Éolien Offshore vise à déployer sur les ZEE des Antilles, un parc éolien d'une puissance crête de 30 GW, équipé d'aérogénérateurs de 10 à 20 MW. Le déploiement de cette puissance nécessite une superficie de 5 000 à 7 500 km<sup>2</sup> - un front de 100 km profond de 50 à 75 km. L'analyse de risque de l'étude de préfaisabilité est claire. Le risque que l'œil d'un cyclone de classe 5 trace sa route par le milieu de ce front est millénaire, en un endroit quelconque centennal. L'assomption du risque - tenant compte des mesures de sauvegarde préventives - est acceptable par l'opérateur. Le cyclone ne doit pas masquer d'autres risques d'accident plus probable, à commencer par une collision d'un navire ou d'une épave dérivante avec une ou plusieurs éoliennes, d'un sous-marin avec les lignes d'ancrage et les liaisons avec la terre.

Sauf à appliquer le principe de précaution jusqu'à l'immobilisme, il est important de bien comprendre les phénomènes météorologiques exceptionnels des zones du globe concernées par l'exploitation de l'énergie éolienne marine. L'approche « risque cyclonique » de l'éolien tropical marin montre une réalité identique à celle des tempêtes exceptionnelles qui frappent la métropole. Aussi, le retour d'expérience sera aussi fécond d'outre-mer vers la métropole que dans le sens inverse.

Les éoliennes flottantes sont par leur capacité de mouvement sur l'élément liquide moins vulnérables que les éoliennes fixées au sol. La France avec son « immense » zone économique dont la plus grande part est particulièrement bien éventée et sans usage concurrent, n'a besoin que d'un « savoir vouloir » pour devenir un État producteur d'énergie propre à mettre à la disposition des nombreux clients de notre planète.