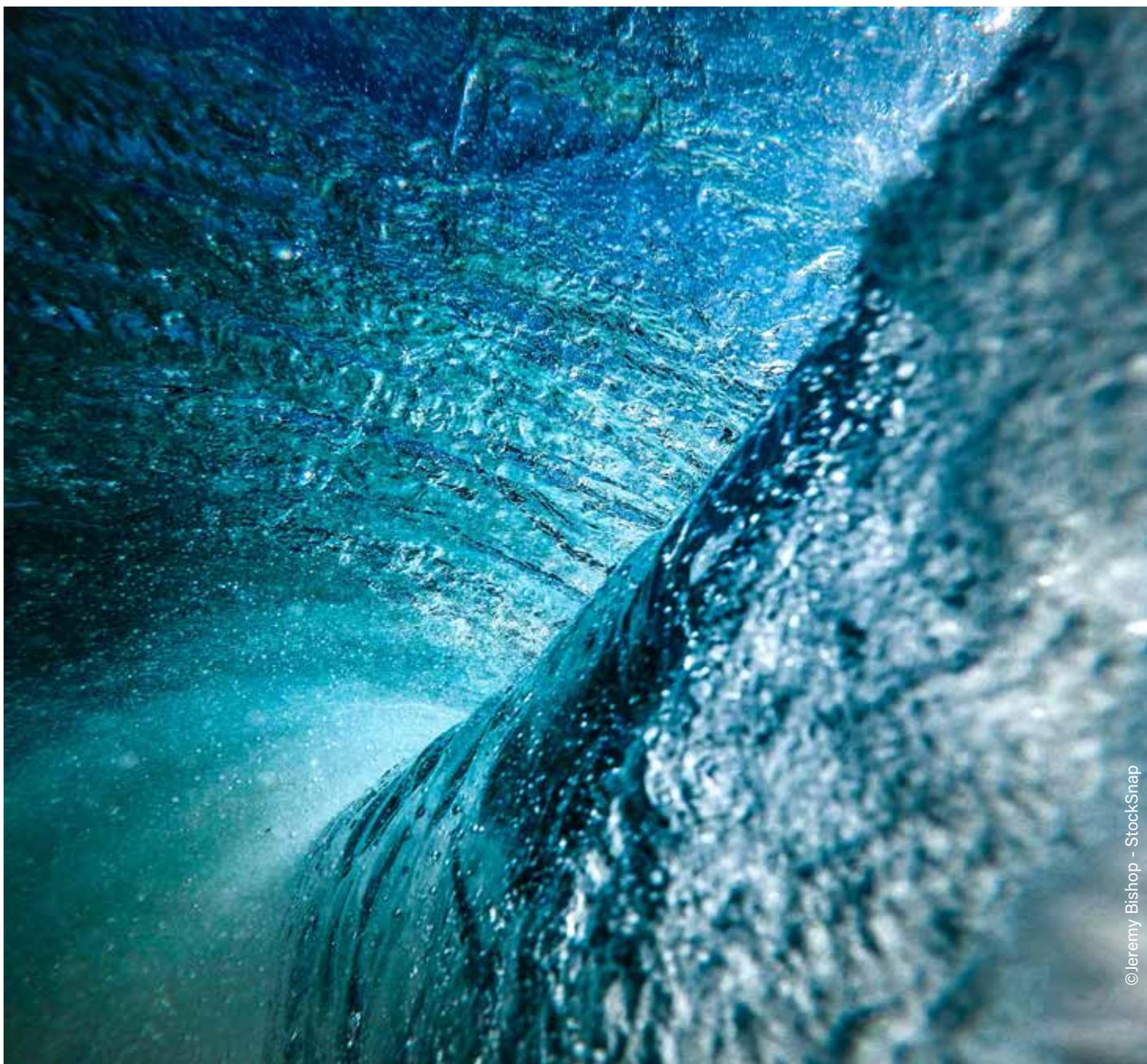
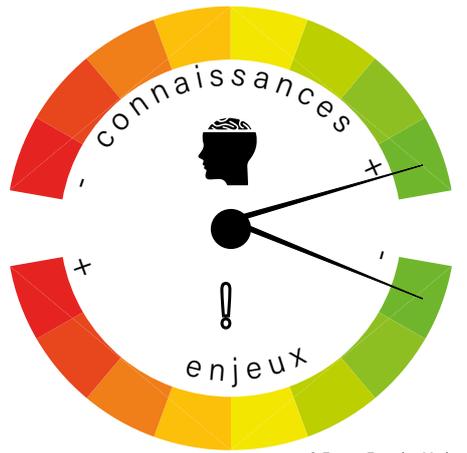


# Les parcs éoliens posés peuvent-ils générer des vagues dangereuses ?



©Jeremy Bishop - StockSnap

**Bulletin n°01**  
Décembre 2019



*Problématique jugée comme  
« non enjeu, sans manque de connaissance »  
par les experts*

## Experts scientifiques

Anne DUPERRET - Géomorphologue - Université Le Havre Normandie

Antoine MORVAN - Hydrodynamicien - ENSTA Bretagne

Marc PREVOSTO - Ingénieur Génie Océanique - Ifremer

Alexei SENTCHEV - Océanographe - Université du Littoral Côte d'Opale

Damien SOUS - Océanographe - MIO - Université de Toulon / SIAME - Université de Pau et des Pays de l'Adour

Julien TOUBOUL - Océanographe - MIO - Université de Toulon

## Coordination, synthèse et rédaction

Maëlle NEXER - France Energies Marines

## Avec la participation de

Guillaume DAMBLANS - France Energies Marines

Jean-François FILIPOT - France Energies Marines

Antoine MAISON - France Energies Marines

Paul PLATZER - France Energies Marines

# Les vagues dangereuses

Une vague peut être dangereuse par ses caractéristiques (hauteur, cambrure), son apparition imprévisible et/ou sa localisation, plus ou moins proche de la côte. Elle peut avoir des effets néfastes sur les embarcations, les zones côtières et les infrastructures en mer.

Il existe plusieurs types de vagues dangereuses :

- **les tsunamis** générés par des phénomènes géologiques ou météorologiques,
- **les vagues scélérates** générées par des conditions particulières d'états de mer,
- **les vagues d'impact** générées par la chute d'un objet dans l'eau.

Dans ce bulletin, toutes les étapes ont suivi la logique du pire des scénarios afin d'obtenir les résultats correspondant aux circonstances les plus défavorables possible.



# 1 Les parcs éoliens posés peuvent-ils engendrer des modifications géologiques capables de générer des tsunamis ?

## UN TSUNAMI, C'EST QUOI ?

Un tsunami est une onde longue qui se propage alors que la profondeur est très inférieure à sa longueur d'onde (conditions non dispersives). Le mouvement associé à cette onde concerne toute la colonne d'eau. L'origine d'un tsunami est le plus souvent géologique (séisme sous-marin, éruption volcanique, glissement de terrain côtier ou sous-marin), météorologique ou causée par l'impact d'une astéroïde.

Un tsunami va créer un envahissement exceptionnel et rapide du rivage par la mer, dû à une surcote temporaire c'est à dire une élévation anormale du niveau de la mer.

## LES TSUNAMIS EN CHIFFRES

### Au large :

- Vitesse de propagation : centaines de km/h
- Longueur d'onde : plusieurs centaines de km
- Hauteur : 1 cm à 1 m

### A la côte :

- Dépend des conditions locales
- Vitesse de propagation : dizaines de km/h
- Longueur d'onde : plusieurs centaines de m
- Hauteur : jusqu'à des dizaines de m
- Hauteur d'inondation (run-up) : dizaine de m

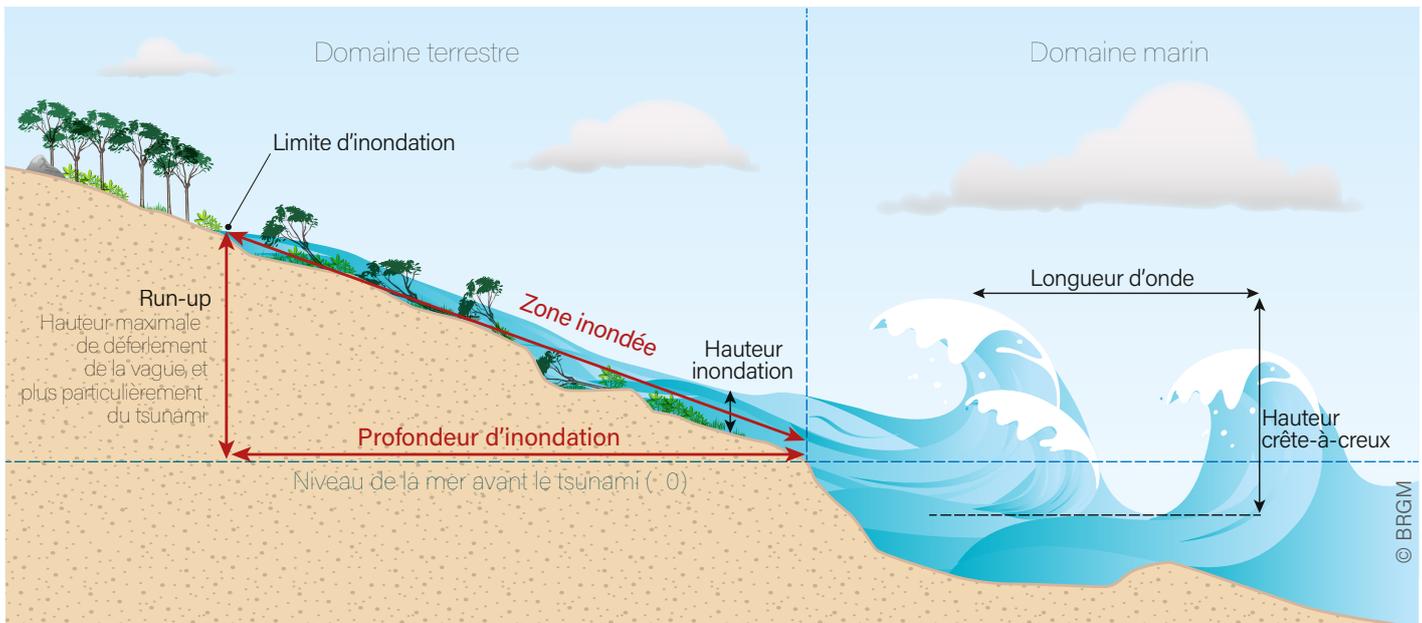


Fig. 1 Tsunami sur un littoral

## DES GLISSEMENTS OU EFFONDEMENTS CÔTIERS INDUITS PAR UN PARC ÉOLIEN POSÉ ?

Dans le cadre d'un parc éolien posé en mer, seuls les glissements sous-marins et côtiers peuvent être générateurs de tsunamis. Les parcs éoliens ne peuvent pas causer d'éruption volcanique, de séisme ou d'impact d'astéroïde.

Les glissements ou effondrements côtiers résultent des effets combinés de phénomènes géologiques

(déficit en sédiments côtiers, altération de la roche mère), océanographiques (houle, marée, courant) et météorologiques (précipitation, gel). Les parcs éoliens posés peuvent avoir une influence minimale sur la houle, les courants, et sur le transport sédimentaire qui pourrait déstabiliser les falaises côtières.

Afin d'estimer la probable influence des parcs éoliens sur le transport sédimentaire, les experts ont calculé l'affouillement, c'est-à-dire l'érosion à la base de l'éolienne. La profondeur d'affouillement peut atteindre 1,7 fois le diamètre du monopieu et la distance d'affouillement de 10 fois le diamètre. Dans le cas de fondation gravitaire l'embase mesurant 36 m de diamètre, il n'y a plus d'influence majeure sur la dynamique sédimentaire au-delà de 360 m. Pour les autres types de fondation (jacket, monopieu) qui ont un diamètre moindre, la distance est inférieure. Les parcs éoliens étant situés à une dizaine de kilomètres des côtes, ils ne peuvent pas augmenter le risque de tsunamis liés à des glissements littoraux.

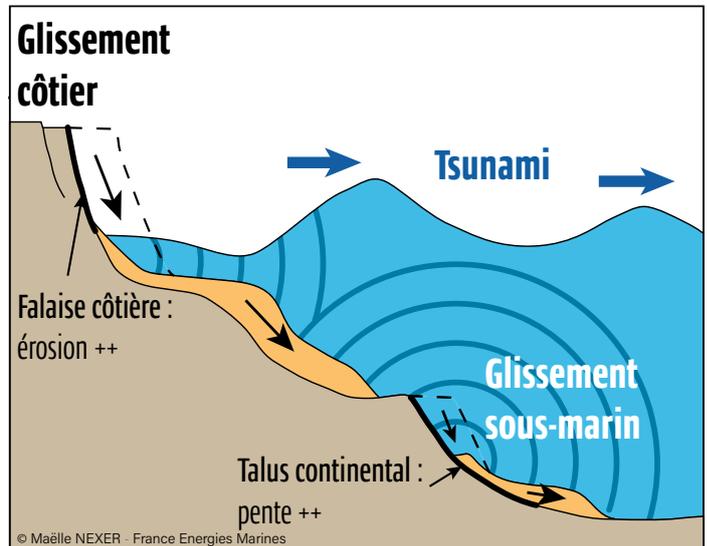


Fig. 2 Mécanisme de génération d'un tsunami via un glissement côtier ou sous-marin

## DES GLISSEMENTS SOUS-MARINS INDUITS PAR LES PARCS ÉOLIENS POSÉS ?

Les glissements de terrain sous-marins se produisent lorsque la pente du talus continental est importante (fig. 2). Les parcs éoliens posés sont situés en domaine de plateau continental avec une très faible pente (fig. 3). Un parc éolien en mer posé, ne peut donc pas générer de glissements sous-marins.

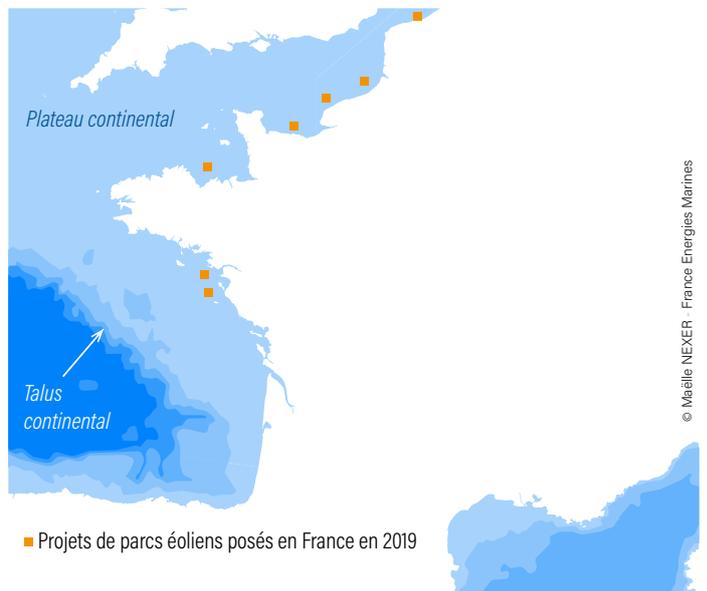


Fig. 3 Carte des projets de parcs éoliens posés en France en 2019



### EN BREF :

Les parcs éoliens posés ne peuvent pas engendrer de tsunamis.

## 2. Les parcs éoliens posés peuvent-ils engendrer une modification de l'état de mer pouvant provoquer des vagues scélérates ?

La modification de l'état de mer au sein d'un parc éolien posé pourrait provenir du phénomène de diffraction et par l'instabilité modulationnelle causée par le réseau d'éoliennes.

### ●● UNE VAGUE SCÉLÉRATE, C'EST QUOI ?

Une vague scélérate est une onde courte associant hauteur et cambrure importantes. Les vagues scélérates sont exceptionnellement grandes par rapport à leurs voisines (Hauteur de la vague scélérate > 2 Hauteur de la houle) (Touboul et Kharif, 2015) (fig. 4).

Les vagues sont générées par le vent, parmi celles-ci une vague scélérate peut être le résultat de :

- l'effet d'un courant fort contre de la houle,
- la rencontre de deux systèmes de vagues (deux systèmes dépressionnaires concourants),
- la focalisation correspond à la concentration de l'énergie des vagues à un endroit et un moment donné, elle peut être accentuée ou non par des effets non linéaires.

Une vague scélérate peut apparaître dans un état de mer donné que l'on a sous-estimé: tous les phénomènes qui l'induisent n'auront pas été pris en compte dans les modèles de prédiction à court ou long termes.

### ●● LES VAGUES SCÉLÉRATES EN CHIFFRES

#### Au large :

- Vitesse de propagation : quelques dizaines de km/h
- Longueur d'onde : dizaines à centaines de m
- Hauteur : < 20 m
- Possibilité de déferlement

#### A la côte :

- Quelques rares cas de submersion à la côte

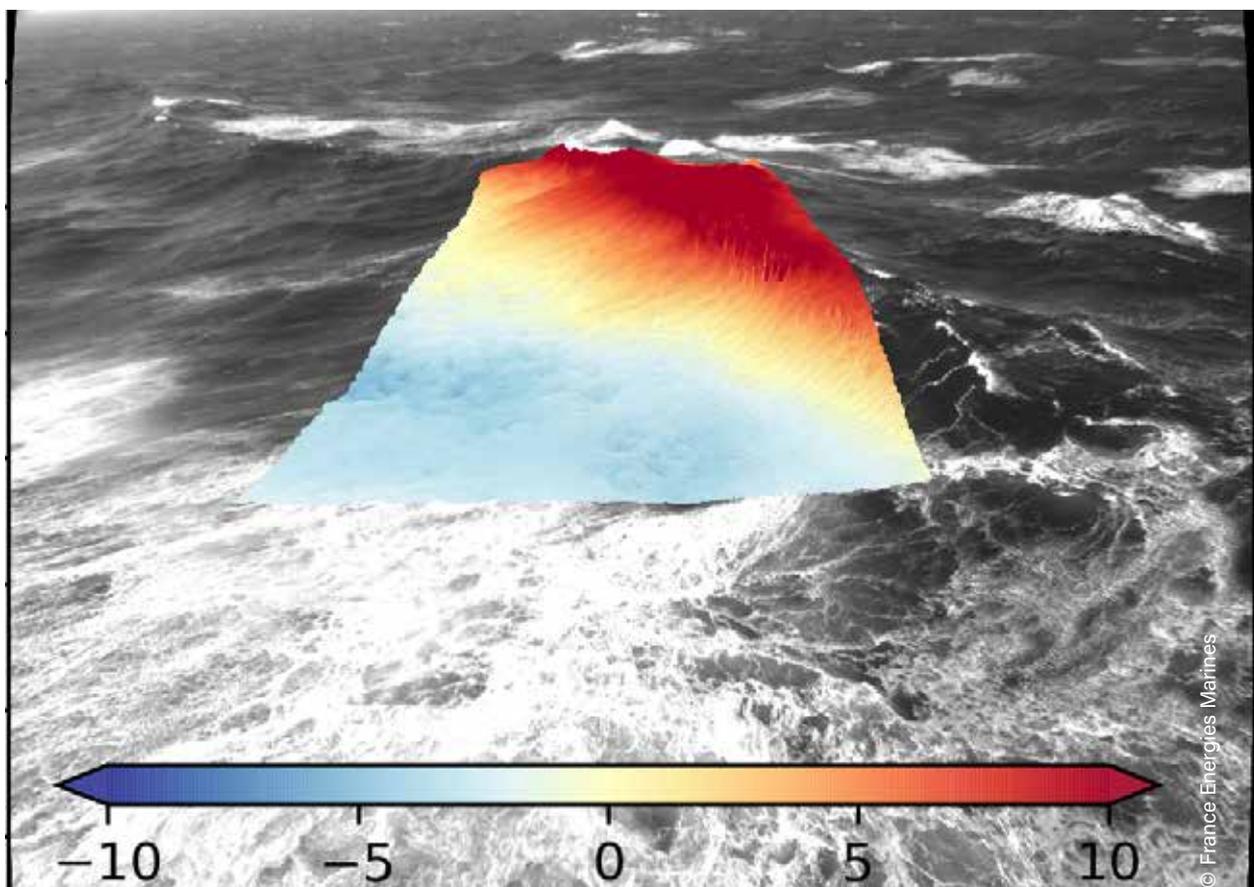


Fig. 4 Vague scélérate de 17 m au large de l'île d'Ouessant - Projet DIME (échelle en m)

## LA DIFFRACTION

Plus le diamètre des fondations est grand, plus les vagues sont diffractées. Ainsi, pour des fondations jackets (treillis métallique en acier), les vagues ne subissent pas de modification car la dimension de l'obstacle est très inférieure à leur longueur d'onde. Pour les fondations monopieux et gravitaires, les vagues pouvant être diffractées sont de faibles amplitudes et de courte période. Ces vagues vont se propager radialement. A 500 m de l'éolienne, il ne reste que

5% de la hauteur de la vague induite. Pour le pire des cas, à savoir des fondations gravitaires d'un diamètre d'environ 30 m, à 2 km du parc, l'état de mer s'est reconstitué, identique à ce qu'il serait sans la présence de la ferme. Il n'y a donc pas d'augmentation du risque de génération de vagues scélérates dangereuses causées par la diffraction inhérente à la géométrie du parc éolien.

## L'INSTABILITÉ MODULATIONNELLE

Le mécanisme d'instabilité modulationnelle, (instabilité de Benjamin-Feir) peut également être à l'origine de la formation de vagues scélérates. Ce mécanisme correspond à une résonance non linéaire des différentes vagues présentes dans un train de houle (Kharif et Pelinovsky, 2003).

En effet, s'il y a une faible perturbation, l'équilibre qui existe entre une vague et ses voisines pourra être rompu. L'une des vagues du groupe captera alors, par résonance, l'énergie de ses voisines, devenant beaucoup plus grosse. Cette croissance pourra amener la vague à tripler sa hauteur initiale. Cependant, cette très grande vague aura une durée de vie limitée, puisqu'à terme, elle rendra son énergie à ses voisines.

En pratique, ce mécanisme s'applique à des houles de très faible étalement spectral, évoluant en profondeur grande par rapport à leur longueur d'onde.

Les experts se sont interrogés sur les perturbations qui pourraient être induites par l'espacement entre les éoliennes. Peuvent-elles déclencher ce mécanisme d'instabilité ? La climatologie des états de mers dans les parcs éoliens présents sur les côtes françaises permet d'affirmer que de telles conditions ne peuvent y être rencontrées, compte tenu des dimensions caractéristiques respectives des parcs et des états de mer.

### EN BREF :

Le phénomène de diffraction au sein d'un réseau de parc éolien posé n'engendre pas de vagues dangereuses pour l'Homme.

De même, la climatologie des états de mers dans les parcs éoliens français permet d'affirmer qu'il ne peut pas y avoir de vagues dangereuses créées par le mécanisme d'instabilité de Benjamin-Feir.



# 3. Les vagues d'impact générées par la chute d'objet au sein d'un parc éolien en mer peuvent-elles être dangereuses ?

Dans de très rares cas, lorsqu'une éolienne est défaillante, la chute d'un objet dans l'eau peut créer une vague d'impact qui peut se propager. Si ce phénomène se produit, cette vague est-elle dangereuse ?

## UNE VAGUE D'IMPACT, C'EST QUOI ?

Les vagues d'impact sont générées par la chute d'objets non naturels.

L'impact d'une structure sur l'eau génère un splash et des ondes de radiation concentriques qui induisent la vague d'impact (fig. 5). Les ondes concentriques sont cantonnées à la surface et se dissipent rapidement. Le splash est un mélange d'air et d'eau qui dissipe une partie de l'énergie du choc. Il ne participe pas à la génération de la vague d'impact, et n'est pas dangereux.

Plus la surface de l'eau est lisse, plus la surface de contact entre l'objet et l'eau sera grande, ce qui va favoriser les transferts d'énergie. Ainsi l'impact sera maximal par mer calme et minimal par mer agitée.

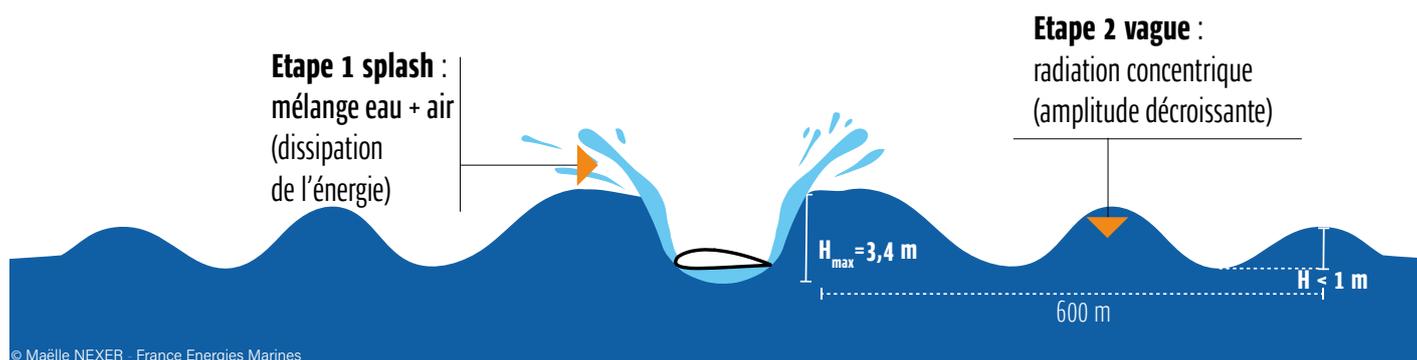
## LES VAGUES D'IMPACT EN CHIFFRES

### A proximité de l'impact :

- Vitesse de propagation : < 10 km/h
- Longueur d'onde : plusieurs dizaines de m
- Hauteur: plusieurs m
- Possibilité de déferlement
- Durée de vie : quelques centaines de m

### A la côte :

- Pas de déferlement : amplitude ~10 cm



© Maëlle NEXER - France Energies Marines

Fig. 5 Vague d'impact générée par la chute d'une pale d'éolienne dans la mer

## UN PEU DE PHYSIQUE

La physique mise en jeu lors de l'impact d'objets dans l'eau est très complexe car elle implique la compressibilité de l'air et la viscosité de l'eau. Elle met en jeu aussi l'interaction fluide/structure régissant la dissipation d'énergie par déformation des milieux impactants et impactés liée à leur différence de densité et de résistance au choc. Ainsi, seule une chaîne de calculs très complexes impliquant une

physique fortement non linéaire est capable de répondre de façon précise à ce problème, ce qui n'est pas l'objectif ici. La philosophie de la méthode est donc de proposer une approche simplifiée en s'assurant du conservatisme des hypothèses à chaque étape, afin de conclure sur une valeur théorique maximale qui ne pourra en aucun cas être dépassée.

## ESTIMATION DE LA HAUTEUR DE LA VAGUE

Il faut noter que la probabilité qu'une éolienne ait une défaillance majeure au point de provoquer la chute d'un objet est très faible.

Pour déterminer si la vague générée dans ce cas est dangereuse, les experts ont calculé dans un premier temps la hauteur de la vague générée par la chute d'objets provenant d'une éolienne. Afin d'être conservatifs dans la suite des calculs, le pire des cas

a été étudié, c'est à dire une surface plane impactée par un objet. Il convient de noter que cet état de mer n'existe pas dans le milieu naturel.

### LA CHUTE DE L'ÉOLIENNE

En cas de rupture, le mât toucherait l'eau de façon progressive de la base vers la nacelle. L'impact serait donc minime.

De plus, la géométrie arrondie du mât implique une surface de contact instantané réduite. L'effort d'impact d'un objet sur l'eau étant proportionnel à la surface de contact instantané et au carré de sa vitesse, la chute du mât dans l'eau ne générera pas de vague dangereuse.

### LA CHUTE DE PALE

Il est presque impossible que les trois pales rompent en même temps, le cas de la chute du rotor n'est donc pas étudié. Le cas considéré ici correspond à la chute

d'une pale d'éolienne d'une puissance 10 MW, d'une envergure de 86 m, se décrochant à vitesse de rotation maximale (10 tours/min) en position horizontale et en supposant que celle-ci stoppe sa rotation et atterrisse à plat sur la surface de la mer.

Cette étude montre que la vague générée par un tel impact ne pourra théoriquement pas dépasser 3,4 m et à 600 m d'un point d'impact sera inférieure à 1 m.

Cette vague n'est pas considérée comme dangereuse car les parcs offshore sont situés à plus de 10 km de la côte et les éoliennes sont espacées de 1 km.

## MÉTHODOLOGIE DE CALCUL

Le mouvement de la chute d'une pale se décompose en trois temps :

**Phase 1 :** Décrochage de la pale et chute dans l'air

**Phase 2 :** Impact sur la surface libre

**Phase 3 :** Transmission d'énergie cinétique en énergie potentielle et atténuation de celle-ci par propagation

Pour la suite des calculs, les experts considèrent donc l'hypothèse suivante : l'énergie cinétique d'impact est transformée en énergie de déplacement d'un volume d'eau.

Pour les phases 2 et 3, deux scénarios ont été comparés donnant les mêmes résultats à 0,01 m près :

#### Scénario 1

Approche vague unique : on suppose que l'intégralité de l'énergie est transmise à une seule vague et que son atténuation dans sa propagation radiale est uniquement liée à la dispersion concentrique de l'énergie.

#### Scénario 2

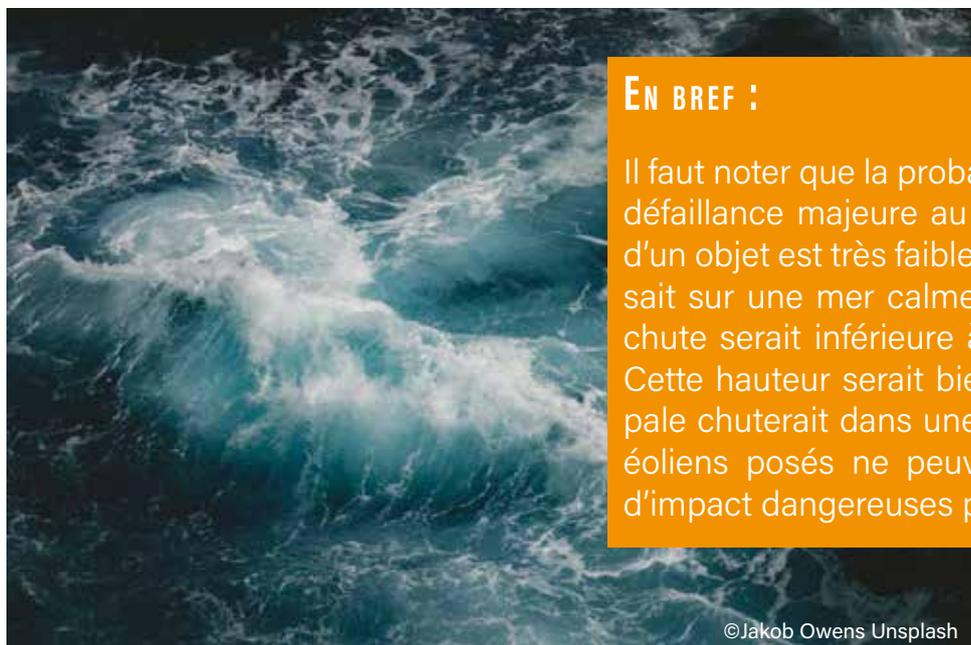
Approche tsunami : on utilise un modèle développé pour l'estimation de tsunami suite à l'impact d'un astéroïde en plein océan proposé par (Ward et al., 2000).

Par ailleurs il convient de noter que la vague réellement générée sera très nettement inférieure, principalement pour les raisons suivantes :

- Toute l'énergie d'impact est supposée transmise à la vague générée, alors que des modèles spécifiquement développés pour la chute d'astéroïdes montrent que seulement 15 % de cette énergie est réellement impliquée dans la génération de tsunamis. Cependant, ces modèles ne sont pas applicables sans adaptation, car ils sont conditionnés pour des matériaux compacts, sphériques et denses alors que nous sommes en présence d'un corps élancé et léger (masse volumique 44 fois plus faible qu'un astéroïde). L'énergie transmise à la vague sera nécessairement inférieure ;

- Cette énergie est concentrée en une seule vague alors qu'en réalité, un train d'ondes est généré, répartissant ainsi l'énergie sur plusieurs vagues ;

- La différence de densité des deux milieux ainsi que la vitesse d'impact indiquent qu'il est très probable que la pale se désagrège sous le choc, dissipant ainsi la majorité de l'énergie mise en jeu sans créer de vague, comme dans le cas de la chute d'une pale sur terre.



### EN BREF :

Il faut noter que la probabilité qu'une éolienne ait une défaillance majeure au point de provoquer la chute d'un objet est très faible. Si ce phénomène se produisait sur une mer calme, la vague générée par cette chute serait inférieure à 3,4 m et très vite atténuée. Cette hauteur serait bien moindre dans le cas où la pale chuterait dans une mer formée. Ainsi, les parcs éoliens posés ne peuvent pas générer de vagues d'impact dangereuses pour l'Homme.

# Conclusions

## Tsunamis

Pas d'enjeu

L'origine d'un tsunami est géologique, météorologique ou causée par l'impact d'une astéroïde. Dans le cadre d'un parc éolien posé en mer, seuls les glissements sous-marins et côtiers pourraient être générateurs de tsunamis. Les parcs éoliens étant situés à une dizaine de kilomètres des côtes, ils ne peuvent pas augmenter le risque de tsunamis liés à des glissements littoraux. Les parcs éoliens posés sont situés en domaine de plateau continental avec une très faible pente, ils ne peuvent donc pas générer de glissements sous-marins. Les experts ont conclu qu'un parc éolien ne peut pas générer de tsunamis.

## Vagues scélérates

Pas d'enjeu

Une vague scélérate est une onde courte associant hauteur et cambrure importantes. Dans le cas d'un parc éolien posé, les experts ont considéré que la diffraction et l'instabilité modulationnelle peuvent être un facteur de génération de vagues scélérates. En prenant en compte les dimensions des projets de parcs éoliens français ainsi que les conditions climatiques, les experts ont calculé la probabilité d'apparition de tels phénomènes au sein de ces zones. Pour eux, le phénomène de diffraction dans un parc éolien posé ne modifie pas la dangerosité pour l'homme d'un état de mer. De même, la climatologie des états de mers dans les parcs éoliens français permet d'affirmer qu'il ne peut pas y avoir de vagues dangereuses créées par le mécanisme d'instabilité de Benjamin-Feir.

## Vagues d'impact

Pas d'enjeu

Il faut noter que la probabilité qu'une éolienne ait une défaillance majeure au point de provoquer la chute d'un objet est très faible. Pour déterminer si la vague générée dans ce cas est dangereuse, les experts ont calculé la hauteur de la vague générée par la chute d'objets provenant d'une éolienne. Si ce phénomène se produisait sur une mer calme, la vague générée par cette chute serait inférieure à 3,4 m et très vite atténuée. Cette hauteur serait bien moindre dans le cas où la pale chuterait dans une mer formée. Ainsi, les parcs éoliens posés ne peuvent pas générer de vagues d'impact dangereuses pour l'Homme.



©Free Stock

Les parcs éoliens posés ne peuvent pas engendrer de vagues dangereuses. Cette problématique est donc jugée comme un non enjeu et ne nécessite pas d'approfondissement scientifique spécifique.

# Bibliographie

Besio G., et Losada M. A. « Sediment transport patterns at Trafalgar offshore windfarm ». *Ocean Engineering* 35, n°7, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.01.002>.

Damblans G., Berhault C., Marcer R., Cinello A., et Pétrié F. « CFD and Experimental Investigations of Slamming Load Prediction on Subsea Structures in Splash Zone », s. d., 7.

« DNV-RP-C205 Environmental Conditions and Environmental Loads », 2014.

Holsapple K. A. et Schmidt. R. M. « On the Scaling of Crater Dimensions: 2. Impact Processes ». *Journal of Geophysical Research* 87, n° B3, 1982. <https://doi.org/10.1029/JB087iB03p01849>.

Lambert, J., et Terrier. M. « Historical Tsunami Database for France and Its Overseas Territories ». *Natural Hazards and Earth System Science* 11, n° 4, 2011. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1037-2011>.

Lambert J., Terrier M., et Pedreros J. « L'évaluation du risque de tsunamis sur le littoral français ». *Géosciences*, 2013, 54-63.

Simon P., Litt E., Couch S., et Davies A. « The impact of tidal stream turbines on large-scale sediment dynamics ». *Renewable Energy* 34, n° 12, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.06.015>.

Prevosto, M. et Bouffandeau B. « Probability of Occurrence of a "Giant" Wave Crest ». In *21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Volume 2*, 483-90. Oslo, Norway: ASME, 2002. <https://doi.org/10.1115/OMAE2002-28446>.

Thiébot, J., Bailly du Bois P., et Guillou S. « Numerical Modeling of the Effect of Tidal Stream Turbines on the Hydrodynamics and the Sediment Transport – Application to the Alderney Race (Raz Blanchard), France ». *Renewable Energy* 75, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.021>.

Touboul J., et Kharif C. « Les vagues scélérates : mécanismes de génération et prédictibilité ». *La Météorologie* 8, n° 90, 2015. <https://doi.org/10.4267/2042/56840>.

Whitehouse R., Harris J., Sutherland J., et Rees J. « The nature of scour development and scour protection at offshore wind-farm foundations ». *Marine Pollution Bulletin* 62, n° 1, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.09.007>.

Ward, S. « Asteroid Impact Tsunami: A Probabilistic Hazard Assessment ». *Icarus* 145, n° 1, 2000. <https://doi.org/10.1006/icar.1999.6336>.

---

Tous droits réservés.

Les textes de ce bulletin sont la propriété de France Energies Marines.

Ils ne peuvent être reproduits ou utilisés sans citer la source et sans autorisation préalable. Les photos, les schémas et les tableaux (sauf indication contraire) sont protégés par le droit d'auteur.

Ils restent la propriété de France Energies Marines et ne peuvent être reproduits sous quelque forme ou par quelque moyen que ce soit, sans l'autorisation écrite préalable de France Energies Marines.

Citer le document comme ci-dessous :

Nexer M., Damblans G., Duperré A., Filipot J-F., Maison A., Morvan A., Platzer P., Prevosto M., Sentchev A., Sous D. et Touboul J.

Les parcs éoliens posés peuvent-ils générer des vagues dangereuses ?

Bulletin COME3T n°01

Plouzané : France Energies Marines, 2019, 12 pages.

Edition : Décembre 2019

Dépôt légal à parution.

Conception graphique : Maëlle NEXER - France Énergies Marines



Bâtiment Cap Océan  
Technopôle Brest Iroise  
525, Avenue Alexis De Rochon  
29280 Plouzané  
02 98 49 98 69

[www.france-energies-marines.org](http://www.france-energies-marines.org)

ISBN 978-2-9567155-3-5



© France Energies Marines - 2019