

## LA SÉCURITÉ PUBLIQUE DES CENTRALES ÉOLIENNES INDUSTRIELLES constat de carence

Extrait et mise à jour le 05/03/2018  
du [rapport rédigé en 2007](#) par  
Jean-Pierre Abalain  
Ingénieur Général du Génie maritime  
Jean-Yves Chazal  
Ingénieur École Navale  
Bernard Schumpp  
Ingénieur INSA-Lyon

### Risques intrinsèques des aérogénérateurs du a des ruptures et projections de pales

- 2007 lorsque ce rapport <sup>(1)</sup> a été publié, les éoliennes « ancienne génération » mesuraient en bout de pales environ 125 mètres.
- en 2017 les éoliennes « nouvelle génération » atteignaient couramment 165 mètres de haut et les prochaines vont dépasser 200 mètres.

C'est pour cette raison que ce rapport vient d'être réactualisé par Jean-Pierre Abalain concernant le volet sur les risques de rupture de pales.

Bien que les machines « nouvelles génération » tournent moins vite que les précédentes leur hauteur ayant été augmentée de plus de 70%, Il était donc important de mettre à jour les calculs concernant les risques intrinsèques en cas de rupture de pales.

La principale conclusion est que :

**Compte tenu de la forte augmentation des hauteurs de fut et des diamètres d'hélice les distances maximales atteintes sont toujours aussi considérables, de 710 mètres à 1070 mètres.**

**On peut donc être assuré que, dans des cas courants, on observera des projections bien supérieures à 500 mètres, distance à partir de laquelle il est possible, aux termes des dispositions légales actuelles, que se trouvent des habitations.**

## Etude et conclusions

En cas de rupture au niveau du rotor la balistique permet de calculer la distance à laquelle des éléments peuvent être éjectés

### Distance de projection à vitesse de rotation nominale

#### ÉOLIENNE ANCIENNE GENERATION

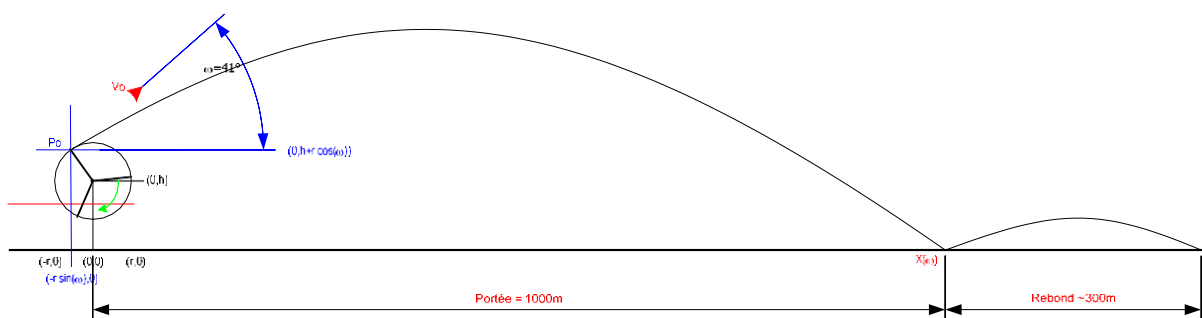
Hauteur en bout de pale de 120 mètres

Nous considérons un aérogénérateur comportant une hélice de rayon  $r = 45$  mètres tournant à 20 tours par minute dont la hauteur du rotor est  $h=80$  m. La vitesse des extrémités de pales est de 94 m/s (339 km/heure).

*Chez tous les constructeurs, la vitesse en bout de pale se situe vers les 350 km/h. Ces vitesses sont limitées pour des raisons de structure des machines et de limite de résistance des pales composites.*

*Cette vitesse est comparable à la vitesse de décollage d'un avion gros porteur.*

*L'éjection en extrémité de pale est comparable à la balistique d'une pierre ou d'un projectile lancé par une fronde dont le centre serait l'axe du rotor et le rayon la longueur de la pale de l'aérogénérateur.*



*La portée varie principalement en fonction de l'angle d'éjection ( $\alpha$ ), de la longueur de pale ( $r$ ), de la hauteur du rotor ( $h$ ) et de la vitesse de rotation ( $v$ ). Elle s'exprime par la formule :*

$$X(\alpha) = -r \sin(\alpha) + v^2 \cos(\alpha) \sin(\alpha) / g + v \cos(\alpha) [v^2 \sin^2(\alpha) + 2g(h + r \cos(\alpha))]^{1/2} / g \text{ [m].}$$

*qui résulte des lois élémentaires de la balistique connues de tout bon ingénieur.*

*Pour faire ressortir la portée fondamentale, nous n'avons pas intégré dans cette mise en équation ni la dérive aérodynamique due à la portance, ni l'effet de rebond. La portée maximum est atteinte lorsque l'élément en bout de pale part avec un angle ( $\alpha$ ) d'environ 41 degrés et est de l'ordre de 1.000 m pour une hauteur de 100 m.*

*Le calcul montre que la portée est vraiment importante dans un secteur de  $\alpha \pm 30^\circ$  de part et d'autre de l'angle d'éjection optimal ; elle évolue alors entre 500 et 1.000 m.*

*Libéré, le projectile va impacter le sol avec choc puis ricocher à une vitesse horizontale de l'ordre de 250 km/heure. Comparable aux accidents autoroutiers à très grande vitesse, les débris vont être projetés dans tous les azimuts sur une distance de l'ordre de 300m. Si les effets en surface sont visibles et évidents il n'en est pas de même pour les effets que ce choc aura sur les canalisations (eau, gaz, électricité, ...) situées*

dans le sol à l'emplacement de l'impact. Compte tenu du gigantisme des aérogénérateurs, les servitudes de maintenance usuelles ne protègent plus ce type d'infrastructure. De nouvelles servitudes s'imposent.

Compte tenu du fait que l'aérogénérateur est tripale, il est en position d'éjecter des débris à partir d'une zone de 3 fois 60° soit 180 degrés sur chaque tour de 360 degrés. L'angle de l'hélice étant aléatoire, la probabilité a priori que la distance de projection soit très importante est donc de l'ordre de 1/2 ce qui est loin d'être négligeable.

Cette probabilité unitaire d'accident est à majorer (règle des probabilités conditionnelles) en fonction du nombre d'aérogénérateurs, de leur configuration relative, de leur position par rapport aux infrastructures et de l'orientation du vent.

Le cas d'une centrale en alignement perpendiculaire à la direction du vent entrainera une réaction en chaîne entre aérogénérateurs. Si de plus celle-ci est à proximité d'une voie à grande circulation sous des vents dominants parallèle à la voie, les projections seront multiples.

Un trafic routier de 15 véhicules par minute augmente, de façon non négligeable, la probabilité d'avoir un accident en chaîne sur cet axe de circulation de façon non négligeable

Pour marquer les esprits, il faut retenir que pour une éolienne de 125 m de haut la distance de projection est de 1250 m soit 10 \* HEBP (Hauteur En Bout de Pale).

Les diagrammes de probabilité des constructeurs indiquant d'infimes chances que des débris soient projetés à plus de 200m sont assurément trompeurs.

#### L'aérodynamique

Une pale est analogue à une aile d'avion. Dans le cas d'une rupture d'extrémité de pale, à la loi balistique précédente, il faut ajouter les effets de l'aérodynamique. Le projectile planera et verra la portée atteinte se majorer notablement par rapport à celle mise en évidence par les considérations précédentes.

Voici quelques éléments d'aéronautique permettant de comparer un aérogénérateur à un avion.

- L'envergure d'un aérogénérateur est semblable à celle de l'Airbus A380 (80 mètres d'envergure, 80 mètres de long et 8 mètres de haut à l'empennage). Pour les éoliennes les plus puissantes actuelles, c'est comme si on faisait pivoter la voilure de l'Airbus A380 sur elle-même ; la masse n'étant toutefois pas la même.
- La caractéristique principale d'un planeur, en termes de performance, est sa  finesse  exprimée par un nombre : le quotient de la distance parcourue par la hauteur perdue.

*Par exemple, un Airbus, moteurs coupés, plane à 16 de finesse, c'est à dire qu'il peut parcourir 16 kilomètres à une altitude de départ de 1.000 mètres. Les meilleurs planeurs ont une finesse maximale de 60. Les planeurs monoplaces de Classe Standard - 15 mètres d'envergure - pèsent environ 240 kg à vide et peuvent voler entre 70 et 280 Km/h, avec une finesse de 42*

#### Rupture par défaillance à la vitesse nominale

*Proche d'un bon planeur, un morceau de pale représentant 1/10<sup>ème</sup> de celle-ci (soit environ 3 m<sup>2</sup> et 300 kg) aura une finesse de 30 et se détachant à 100 m du sol pourra planer sur 3.000 m de distance. Ceci, sans tenir compte de la vitesse initiale, de son*

*incidence au moment de la rupture. Bien que les éléments aient perdu une grande partie de leur énergie, il n'en reste pas moins que l'arrivée d'une multitude de débris sur une voie rapide ou sur une propriété fera des dégâts non négligeables voire mortels (cas de sur-accidents sur voie rapide à ne pas négliger). Il serait dangereux d'autoriser l'implantation d'aérogénérateurs à proximité de voies de circulation.*

#### Détachement d'un bout de pale en cas de survitesse

*La tendance des constructeurs est d'abandonner les freins aérodynamiques (car ils sont trop fragiles, compliqués à mettre en œuvre et financièrement coûteux), pour adopter un système de freins électromagnétiques.*

*En cas de défectuosité d'un capteur de pilotage, de coupure de courant et de panne du freinage, c'est l'emballement et l'accident.*

*En survitesse, les limites de résistance des pales sont très rapidement dépassées. Elles explosent et projettent une multitude de débris à très grande vitesse et à de fortes distances. Bien qu'assez rares, nous avons plusieurs exemples d'aérogénérateurs dont le bout de pale a dépassé la célérité du son avant de se désintégrer : dans la Drôme plusieurs dizaines de minutes en survitesse et en Aquitaine avec passage du mur du son.*

#### Destruction par rafale de vent

*Pour un avion, les charges extrêmes sont calculées dans le cas d'une sollicitation due à une rafale de vent ou une ressource avec dégageant. La rafale de vent est un phénomène qui s'applique à une pale d'éolienne. Dans ce cas, les déplacements en extrémité de voilure peuvent atteindre dix pour cent de la longueur de la pale (de l'ordre de 5m pour une aile de 45 mètres en matériaux composites). Une rafale violente peut donc occasionner le choc d'une pale avec le mât, ce qui déséquilibrera l'ensemble de l'aérogénérateur et entraînera la rupture du rotor voire du mât engendrant l'effondrement total de la structure. Il est nécessaire que la probabilité d'un tel type d'accident soit étudiée et quantifiée.*

#### Tourbillons

*Le vent entraîne le rotor par l'intermédiaire des pales et s'écoule derrière celles-ci. Le passage au travers des pales entraîne des modifications de l'écoulement dans la veine provoquant : un ralentissement du vent, des tourbillons dans la veine et sur son pourtour. Ces perturbations n'ont pas échappé aux constructeurs*

*; à tel point que, pour les grandes centrales composées de plusieurs rangées d'aérogénérateurs, ils préconisent les espacements de l'ordre 12 D (1500m) entre deux rangées (direction des vents dominants) et 6 D (800m) entre aérogénérateurs sur une rangée. Ces précautions prises principalement pour des raisons de productivité montrent qu'il y a bien des effets aérodynamiques à plusieurs centaines de mètres.*

*Que penser des effets aérodynamiques d'un alignement quasi parallèle de plusieurs aérogénérateurs à moins de 500 m d'un axe de circulation à grande fréquentation (voie rapide de transport de matériaux dangereux, TGV, ...). En recevant des tourbillons successifs, comment se comporteront les véhicules à grande prise au vent (tels que les caravanes, les mobile-cars de plus en plus nombreux, les camions de plus en plus longs, ...) ? Mettre, ne serait-ce qu'un seul aérogénérateur, à faible distance d'une de ces voies est un acte dangereux.*

*Sur le plan de la circulation aérienne, compte tenu de cet effet tourbillonnaire, il va de soi que le vol d'ultralégers motorisés ou non (ULM, Para-plane, montgolfière, ...) est à réglementer aux abords des centrales éoliennes. D'ailleurs le premier mort civil en Allemagne est une jeune parachutiste inexpérimenté en 2000.*

## L'effondrement

*Statistiquement peu probable selon le CGM, la possibilité d'effondrement d'une éolienne a été largement démontrée dans le monde entier lors des accidents récents et notamment en France par celui de Bouin en Vendée.*

*Le 3 janvier 2018, une petite éolienne Nordex dont la structure ne pesait que 260 tonnes et dont le mat ne mesurait que 62 mètres s'est effondrée.*





## ÉOLIENNE NOUVELLE GENERATION

Hauteur en bout de pale de 165 mètres

Exemple NORDEX de type « Delta génération »

Les éoliennes NORDEX de type « Delta génération » ont connu leur entrée en service en 2013 et sont donc très récentes. Elles se distinguent des précédentes machines par des puissances plus importantes – donc des diamètres d'hélice bien plus grands que précédemment – et en conséquence des hauteurs de nacelles également plus importantes, et ce d'autant plus que Nordex a cherché aussi à dégager l'hélice des turbulences du sol ; corrélativement les vitesses de rotation des hélices ont beaucoup diminué afin de limiter la vitesse linéaire en bout de pale.

Ces éoliennes existent en différentes variantes qui sont présentées comme répondant à des conditions de vent faibles, modérés ou forts. Différentes hauteurs de fut sont possibles afin de les adapter au mieux aux conditions de vent précédentes et à la géométrie du terrain. Les vitesses de rotation des hélices, commandées par la régulation de la machine, sont variables afin d'en optimiser le rendement.

Leurs caractéristiques utilisées dans cette étude sont extraites de la brochure accessible sur le site web de NORDEX :

[http://www.nordexonline.fr/fileadmin/MEDIA/Produktinfos/EN/Nordex\\_Delta\\_Broschuere\\_en.pdf](http://www.nordexonline.fr/fileadmin/MEDIA/Produktinfos/EN/Nordex_Delta_Broschuere_en.pdf)

S'agissant de mettre en évidence les distances de projection d'un élément cassé de pale après rupture ce sont les hauteurs de fut et les vitesses de rotation les plus élevées qui ont été prises en compte.

### 1) Remarques liminaires

Dans ces calculs deux phénomènes ont été négligés :

- La prise en compte de la résistance de l'air.
- La dérive aérodynamique due à la portance du morceau d'aile qui peut planer pendant son vol.

Ces deux phénomènes agissent en sens inverse, le premier minore la portée atteinte tandis que le second l'augmente. L'un dans l'autre on peut considérer que les chiffres avancés donnent un très bon ordre de grandeur des portées atteintes après rupture.

Deux composantes sont calculées :

- Lors de la rupture l'élément détaché se projette dans le plan de la pale du fait de la force centrifuge. La distance maximale atteinte, « d cent max », est calculée.
- Mais pendant son temps de vol cet élément est porté par le vent agissant sur l'éolienne qui déplace l'élément détaché dans le sens du vent et occasionne une composante de déplacement perpendiculaire au précédent. La distance correspondante « d vent » est calculée pour le temps de vol amenant à « d cent max ». Cette distance est calculée pour les conditions de vent maximales de fonctionnement de la machine « V cut out » où elle est mise en drapeau.
- La composition de ces deux déplacements orthogonaux permet de calculer « d tot max » ; le maximum atteint par cette variable est calculé.

Pour chaque type de machine deux cas ont été considérés :

- Un petit élément de pale, long d'un dixième de la longueur de la pale, se détache après rupture.
- Un élément important, long du quart de la longueur de la pale se détache après rupture.

## 2) Résultats obtenus

Ils font l'objet du tableau joint qui présente les résultats des calculs :

- Les caractéristiques des différentes variantes d'éolienne considérées sont rappelées dans les premières lignes.
- «  $\omega$  pour d max » est l'angle de positionnement de la pale par rapport à l'horizontale au moment de la rupture qui aboutit au maximum de « d cent max ».
- « Plage 1 » est l'intervalle angulaire de positionnement de la pale qui amène à des distances de projection supérieures à 90% de « d cent max ».
- « d vent » est la valeur correspondante au déplacement du au vent.
- « d totale max » est la distance maximale constatée en composant la distance due à la force centrifuge et celle due au vent.
- « Plage 2 » est l'intervalle angulaire qui amène à des distances de projection totales supérieures à 90% du maximum atteint par cette variable.
- V impact est la vitesse horizontale avec laquelle l'élément touche le sol.
- Enfin le rapport d totale max/HEBP représente le rapport de la distance totale maximale atteinte par la hauteur en bout de pale.

## 3) Conclusions

Compte tenu de la forte augmentation des hauteurs de fut et des diamètres d'hélice les distances maximales atteintes sont toujours aussi considérables, de 710 mètres à 1070 mètres.

On peut donc être assuré que, dans des cas courants, on observera des projections bien supérieures à 500 mètres, distance à partir de laquelle il est possible, aux termes des dispositions légales actuelles, que se trouvent des habitations.

Les vitesses des éléments lorsqu'ils percutent le sol sont toujours supérieures à 280 km/h ; ils ont donc une énergie cinétique considérable susceptible d'occasionner des dégâts très importants ; et ce d'autant plus que les débris rebondiront sur le sol en se dispersant sur quelques centaines de mètres.

Le rapport de la distance maximale de projection à la hauteur en bout de pale se situe entre 3,8 et 5,3. Il est supérieur à 5 lorsque la longueur de l'élément détaché est égal au dixième de la longueur de pale, valeur déjà importante car faisant plus de quatre mètres. La sécurité des personnes et des biens dans l'environnement de ce type d'éolienne conduit à recommander qu'une servitude au moins égale à 5 fois la hauteur en bout de pale soit créée.

On observe qu'au cours des années passées des éoliennes ont été installées à des distances inadaptées à la sécurité des habitations - 500 m- et très faibles – moins de 100 m – de routes nationales et départementales sans que cela émeuve les services préfectoraux chargés de veiller à la sécurité des personnes et des biens.

Qui plus est, des éoliennes sont installées à proximité de lignes de chemin de fer principales ; on peut, par exemple, en observer en plusieurs emplacements le long de la ligne Brest-Paris, toujours sans que les services préfectoraux chargés de veiller à la sécurité

des personnes et des biens s'en soient le moins émus lors de la délivrance du permis de construire.

Tableau des résultats obtenus

Type de machine	N100/3300		N117/3600		N131/3600		N131/3900	
Élément projeté	Dixième de pale	Quart de pale	Dixième de pale	Quart de pale	Dixième de pale	Quart de pale	Dixième de pale	Quart de pale
P kW	3300		3600		3600		3900	
Diamètre rotor	99,8		116,8		131		131	
V rot en t/mn	9 - 16,1		7,9 - 14,1		7,5 - 13,6		7,9 - 14,4	
H nacelle	100		141		134		134	
Vent cut out en m/s	25		25		22		20	
$\omega$ pour d cent max en degrés	52	52	52	53	52	53	52	52
d cent max en mètres	745	646	790	689	926	804	1024	887
Plage 1 en degrés	76 - 68	37 - 69	37 - 69	38 - 70	37 - 69	38 - 69	37 - 69	37 - 69
d vent correspondant en mètres	308	280	320	299	304	283	291	271
d totale max en mètres	810	710	856	754	976	854	1067	928
Plage 2 en degrés	32 - 66	32 - 67	33 - 67	33 - 68	35 - 67	34 - 68	35 - 66	35 - 68
V impact km/h	300	280	308	286	329	304	345	319
HEBP en m	149,9	149,9	199,4	199,4	192,4	192,4	192,4	192,4
D tot/HEBP	5,4	4,7	4,3	3,8	5,1	4,4	5,5	4,8

Référence

(1) LA SÉCURITÉ PUBLIQUE DES CENTRALES ÉOLIENNES INDUSTRIELLES constat de carence rapport de 2007

<http://epaw.org/documents/Dossier-Risques-eoliens.pdf>

Contact :

Jean-Louis Butré

contact@environnementdurable.net

06 80 99 38 0 8