Analyse des durées de ralentissement du rotor. Résultats issus d'une première série de tests (Septembre 2021)

–

Julie FLUHR, Aurélien BESNARD, Axèle ALEXIS et Olivier DURIEZ

–

Centre d'écologie Fonctionnelle et Evolutive

(UMR 5175, CEFE, Montpellier, France)

–

Projet MAPE - WP3 R3

Le présent rapport fait le bilan des analyses statistiques réalisées pour estimer les durées de ralentissement du rotor d'une éolienne une fois l'ordre d'arrêt lancé par le SCADA. Ce travail s'inscrit dans le cadre du Workpackage WP3 R3 du projet MAPE dont l'objectif est de déterminer les distances de détection minimales des oiseaux par les systèmes de détection-réaction pour réduire les collisions dans les parcs éoliens.

La durée de ralentissement du rotor étant un paramètre clé pour calculer la distance minimale de détection des oiseaux, un protocole (Annexe 1) a été transmis en mai 2021 à l'ensemble des opérateurs éoliens impliqués dans le projet MAPE, de façon à recueillir des données standardisées pour le plus grand nombre de modèles de turbine possible et dans différentes conditions aérologiques. Les tests ont été conduits au cours de l'été 2021 par plusieurs opérateurs éoliens, collaborateurs du projet MAPE.

Lors de l'examen des premières données transmises par les opérateurs, nous avons constaté que la vitesse de rotation du rotor ne descendait pas en-dessous de certains seuils au cours de certains tests, même après 90 secondes. Aussi, nous avons décidé d'estimer séparément deux paramètres :

1) La probabilité que la vitesse de rotation du rotor soit égale ou inférieure à une vitesse seuil de rotation résiduelle au cours du test ;
2) Les durées moyennes nécessaires pour atteindre ces vitesses seuils.

Nous avons également testé l'effet de différentes caractéristiques techniques inhérentes aux turbines et de la vitesse du vent sur ces deux paramètres décrivant le ralentissement des rotors.

Dans ce rapport, nous présentons dans un premier temps un bilan chiffré des données collectées par les opérateurs éoliens. Nous présentons ensuite nos méthodes d'analyse ainsi qu'une sélection de résultats, avant de conclure sur ces durées de ralentissement et de proposer des recommandations pour la suite de ce travail.

Description des données recueillies

À la date de rédaction du présent rapport (septembre 2021), sept opérateurs éoliens impliqués dans le projet MAPE ont participé au protocole et transmis leurs données (cf récapitulatif en Annexe 2). Au total, 137 tests ont été réalisés, correspondant à :

- 5 marques de turbine (Enercon, Nordex, Siemens, Vestas et Senvion)
- 10 modèles de turbine (E70, N117, E82, N90, SWT113, N100, V100, MM82, V80 et V126)
- 4 machines synchrones, 10 machines asynchrones
- Des longueurs de pale comprises entre 35 m et 63 m
- Des hauteurs de nacelles comprises entre 59 m et 117 m

A noter que 4 modèles (N117, V100, M82, E82) ont été testés deux fois :

- Soit par des opérateurs éoliens différents ;
- Soit pour des hauteurs de nacelle différentes pour un même modèle de turbine.

Les proportions (et nombres) de tests réalisés dans chacune des trois classes de vent proposées dans le protocole sont les suivantes :

Vitesse de vent initiale ($m.s^{-1}$)	**< 10**	**[10 – 20[**	**≥ 20**
Proportion de tests	82 % (N = 137)	18 % (N = 24)	0

Méthodes d'analyse statistique des données

Sélection des variables explicatives potentielles

Une analyse par marque et/ou modèle d'éolienne était initialement prévue mais le trop faible nombre de réplicas ne permet pas d'espérer une précision suffisante des paramètres pour le projet MAPE. De plus les données par marques et modèles sont très structurées (voir partie *résultats*), ce qui aurait pu conduire à des estimations complètement biaisées. Nous avons donc combiné l'ensemble des tests et testés l'hypothèse selon laquelle les probabilités et les durées de ralentissement du rotor sont susceptibles d'être influencées par les variables suivantes : le type de turbine (synchrone ou asynchrone), la hauteur de la nacelle, la longueur des pales, la vitesse de vent initiale (au moment du déclenchement de l'arrêt) et la vitesse de rotation initiale du rotor (mesurée en rpm : rotations par minutes). Une analyse préliminaire des corrélations entre ces différentes variables explicatives du ralentissement du rotor a permis de ne conserver, dans les analyses présentées ci-après, que les variables non corrélées entre-elles.

Probabilités d'atteindre une vitesse seuil de rotation résiduelle

Nous avons modélisé la probabilité que la vitesse de rotation résiduelle du rotor atteigne un seuil donné entre le lancement de la commande d'arrêt du rotor par le SCADA et la fin du test (t = 90 secondes) en fonction des variables explicatives retenues à partir de l'analyse de corrélations. Deux seuils de vitesse de rotation résiduelle du rotor (3 et 2 rpm) ont été testés (arbitrairement mais en cohérence avec les discussions menées en CT mais aussi avec les documents de synthèse de KNE).

La probabilité que la vitesse de rotation du rotor atteigne le seuil fixé est estimée à partir d'un modèle linéaire généralisé (GLM) basé sur une distribution Binomiale des données et un lien *logit*. Cette probabilité est modélisée en fonction de différentes variables explicatives testées séparément, mais aussi de manière additive. L'objectif était d'identifier quelle(s) variable(s) influence(nt) cette probabilité d'atteindre une vitesse seuil de rotation et le cas échéant, quel pourcentage de variance de l'ensemble de données elle(s) explique(nt).

Une étape de sélection de modèle, basé sur le critère d'Akaike (AIC), a permis de sélectionner le meilleur modèle pour chaque seuil de vitesse rotationnelle testé, autrement dit, de mettre en évidence la (ou les) variable(s) explicative(s) décrivant le mieux la variabilité de l'ensemble des données.

Durée nécessaire pour atteindre la vitesse seuil de rotation résiduelle

Dans un second temps, nous avons estimé la durée nécessaire au rotor pour atteindre la vitesse seuil de rotation résiduelle fixée (conditionnellement au fait que ce seuil avait été atteint au cours des 90s du test) à partir d'un modèle linéaire (LM), basé sur une distribution Normale des données et un lien identité. De la même manière que pour l'estimation du paramètre précédent, cette durée a été modélisée en fonction de différentes variables explicatives testées séparément, mais aussi de manière additive et en interaction. L'objectif était d'identifier quelle(s) variable(s) influence(nt) significativement la durée de ralentissement du rotor et le cas échéant, quel pourcentage de variance de l'ensemble de données elle(s) explique(nt).

Résultats

Sélection des variables explicatives potentielles

L'analyse des corrélations entre les cinq variables explicatives potentielles a permis de retenir trois variables pour la modélisation des probabilités et des durées de ralentissement du rotor : la longueur des pales, la vitesse de vent initiale et le type de machine (Synchrone « 1 » *vs* Asynchrone « 0 »). Les autres variables sont trop corrélées à ces trois variables pour pouvoir être testées simultanément dans les modèles (tableau 1, figure annexe 3).

Tableau 1. Matrice de corrélation des variables explicatives potentielles de la vitesse de ralentissement des rotors (coefficients de corrélation r, variant entre 1 et -1, ces deux valeurs extrêmes indiquant une corrélation parfaite et 0 une absence de corrélation).

	Hauteur de nacelle	**Longueur de pale**	**Vitesse de vent initiale (m/s)**	**Vitesse de rotation initiale (m/s)**
Hauteur de nacelle	1,00	0,79	-0,23	-0,25
Longueur de pale	0,79	1,00	-0,30	-0,11
Vitesse de vent initiale (m/s)	-0,23	-0,30	1,00	0,76
Vitesse de rotation initiale (m/s)	-0,25	-0,11	0,76	1,00

En effet, la matrice de corrélation montre une forte corrélation entre la longueur des pales (m) et la hauteur de la nacelle (m), ainsi qu'entre la vitesse de vent initiale (m/s) et la vitesse de rotation initiale du rotor (m/s) (coefficients de corrélation compris entre 0.75 et 1).

A noter que les tests réalisés par les opérateurs concernent majoritairement des machines asynchrones (Fig. 1, Annexe 2). Les machines asynchrones testées présentent par ailleurs des longueurs de pale plus grandes que pour les tests réalisés sur les turbines synchrones. A noter aussi que très peu de tests ont été réalisés dans des conditions de vent > 10 m/s, et que ces quelques tests concernent majoritairement des machines synchrones (Fig.1, Annexe 2). Les résultats des analyses suivantes sont à interpréter avec précaution du fait de ces déséquilibres (voir la partie *discussion* aussi).

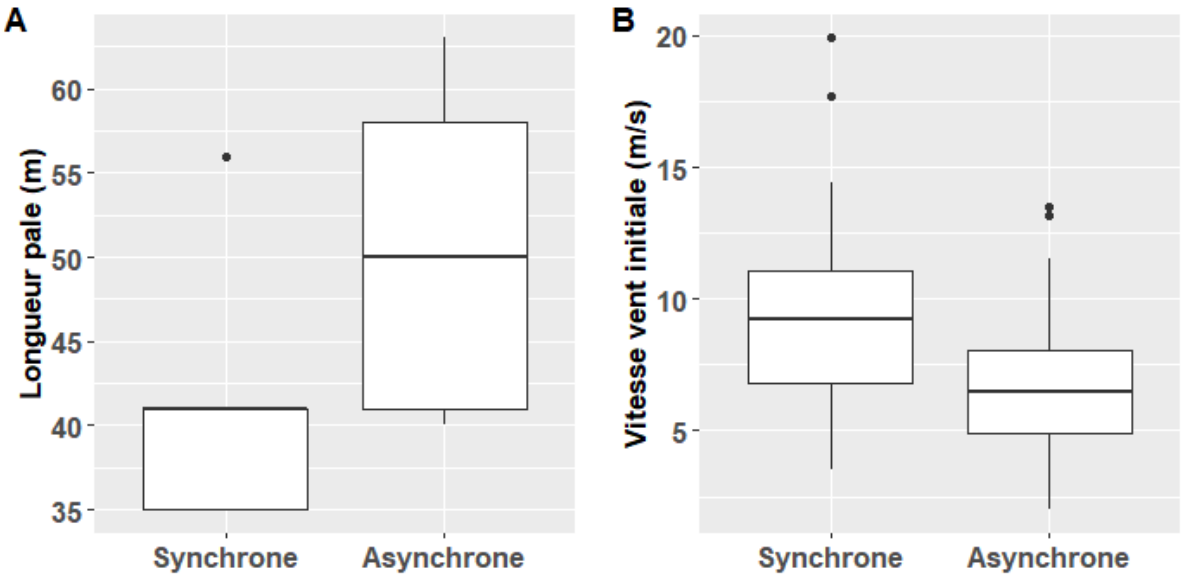

Figure 1. A) Longueur de pale (m) des turbines et B) vitesse de vent initiale (m/s) testées en fonction du type de machine (synchrone *vs* asynchrone).

A noter enfin que la marque et le modèle de turbine n'ont pas été inclus dans la modélisation des probabilités et des durées de ralentissement du rotor puisque les données sont très structurées (les longueurs de pâles sont très dépendantes des modèles, les modèles et marques sont testées majoritairement dans une seule classe de vent). Par exemple, les turbines Enercon et Senvion testées présentent des pales de plus petites tailles (< 42 m) que les turbines Vestas, Nordex et Siemens testées (Fig. 2A). D'autre part, les turbines Vestas et Siemens ont été testées dans des conditions aérologiques plus calmes (vitesses de vent < 7 m/s) que les autres marques (Fig. 2B). Compte tenu de cette structuration les marques et modèles sont des facteurs confondants des autres covariables.

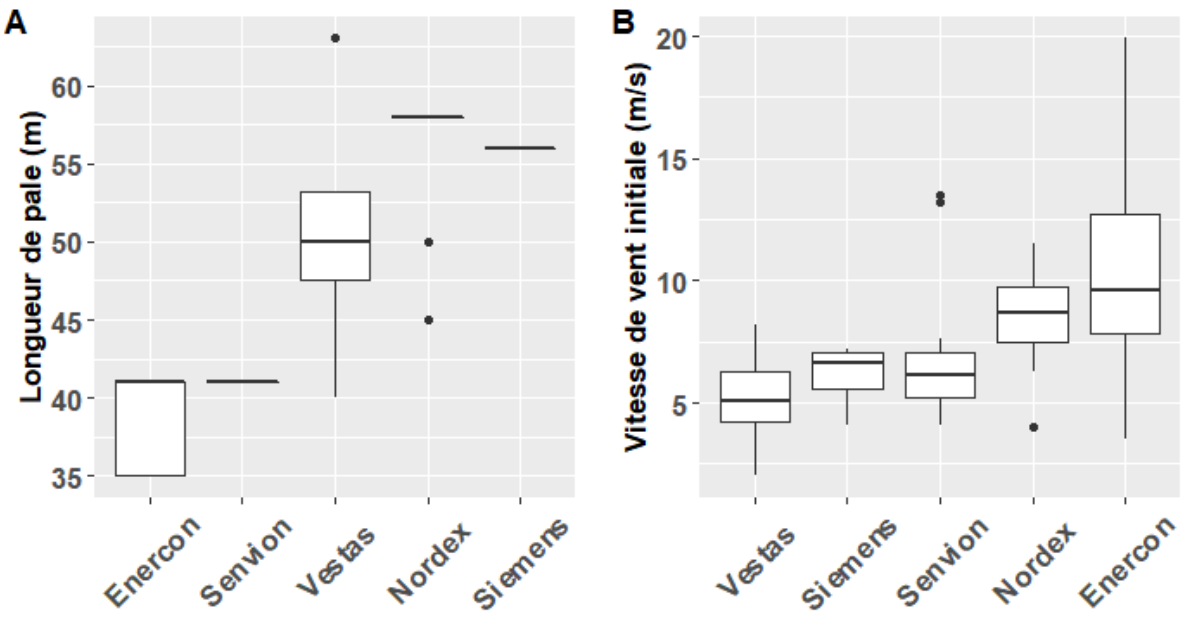

Figure 2. A) Longueur de pale (m) des turbines et B) vitesse de vent initiale (m/s) testées en fonction de la marque de la turbine.

Probabilités d'atteindre une vitesse seuil de rotation résiduelle

Probabilité que la vitesse de rotation résiduelle du rotor soit égale ou inférieure 3 rpm à 90s

Un modèle incluant les trois variables – type de machine, longueur de pale et vitesse de vent initiale – a été testé. Néanmoins, nous ne pouvons présenter les résultats obtenus puisque ce modèle ne converge pas, par manque de données. En effet, peu nombreux sont les tests au cours desquels la vitesse de rotation résiduelle du rotor n'atteint pas le seuil 3 rpm (12 tests sur 137).

Probabilité que la vitesse de rotation résiduelle du rotor soit égale ou inférieure 2 rpm à 90s

Le meilleur modèle inclut les trois variables testées, à savoir le type de machine, la longueur de pale et la vitesse de vent initiale. Ce modèle explique 76% de la variance de l'ensemble des données. Plus la longueur des pales est grande (Fig. 3A) et plus la vitesse de vent initiale est faible (Fig. 3B), plus la probabilité que la vitesse de rotation résiduelle du rotor soit égale ou inférieure à 2 rpm augmente (Fig. 3). A noter que toutes les machines asynchrones ont franchi ce seuil, ces relations ne sont donc valables que pour les machines synchrones, peu nombreuses. Ces résultats sont donc à interpréter avec précaution à ce stade.

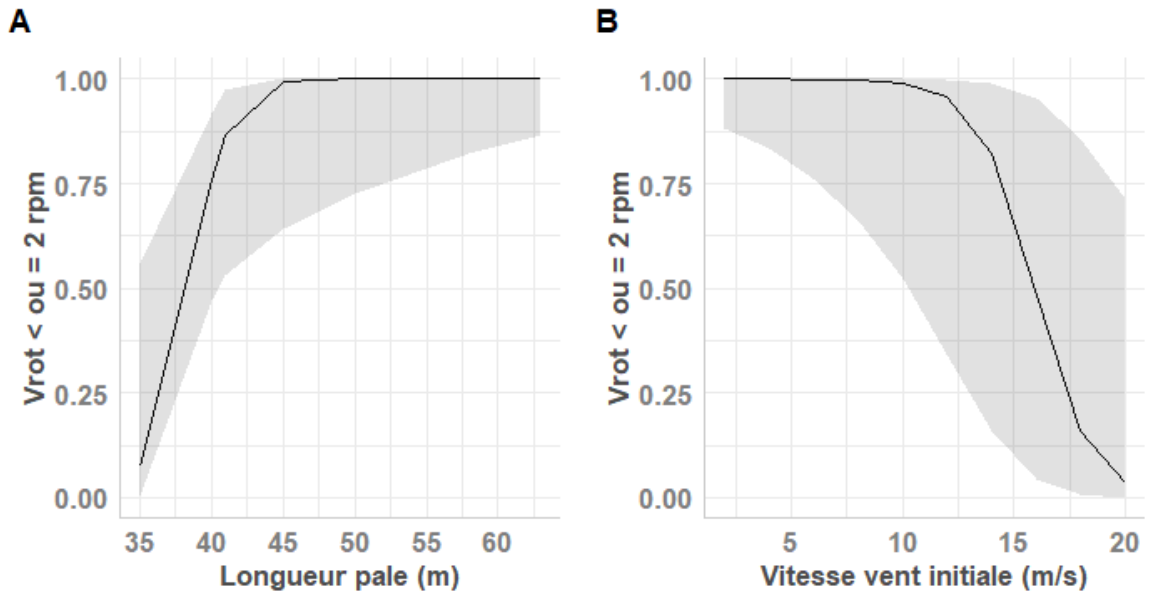

Figure 1. Probabilité que la vitesse de rotation résiduelle du rotor soit inférieure ou égale à 2 rpm au cours des 90 secondes du test en fonction (Vrot < ou=2rpm) de A) longueur des pales, et B) la vitesse de vent initiale pour les machines synchrones. La zone grisée représente l'intervalle de confiance à 95% de l'estimation.

Durée nécessaire pour atteindre la vitesse seuil de rotation résiduelle

Une fois l'ordre d'arrêt lancé au SCADA, il faut compter en moyenne sur l'ensemble des données disponibles 32.2 ± 13.5 secondes et 38.8 ± 14.5 secondes pour que la vitesse de rotation résiduelle du rotor atteigne 3 rpm et 2 rpm, respectivement. Les valeurs de durée de ralentissement les plus élevées pour ces deux seuils sont 55s et 65s respectivement.

La modélisation des durées de ralentissement du rotor pour les seuils de 3 rpm et 2 rpm montrent que le type de machine, la longueur de pale, la vitesse de vent initiale et l'interaction de ces deux dernières variables influencent significativement la durée nécessaire pour atteindre ces seuils de vitesse de rotation résiduelle. Ces variables expliquent 57% et 49% de la variance de l'ensemble des données pour les seuils de 3 rpm et 2 rpm, respectivement.

Les résultats montrent que la durée de ralentissement du rotor pour atteindre les seuils de 3 rpm et 2 rpm est d'autant plus longue que la longueur de pale est grande (Fig. 4A), que la vitesse du vent est élevée (Fig. 4B) et si la machine est de type asynchrone (Fig. 4C et Fig. 5). L'interaction significative entre la longueur de pale et la vitesse de vent initiale implique que pour une vitesse de vent initiale donnée, la vitesse de rotation du rotor ralentit différemment en fonction de la longueur de pale de la turbine (Fig. 6). En effet, en présence de vents de 2 m/s, plus la longueur de pale est grande, plus la durée de ralentissement du rotor est courte. En présence de vent de 5 m/s, la durée de ralentissement du rotor est identique quelque soit la longueur des pales (voire augmente très légèrement pour le seuil de 2 rpm). En revanche, en présence de vent compris entre 10 et 20 m/s, plus la longueur de pale est grande, plus la durée nécessaire au rotor pour atteindre la vitesse seuil de rotation résiduelle augmente (cf Fig. 6 pour le seuil de 3 rpm).

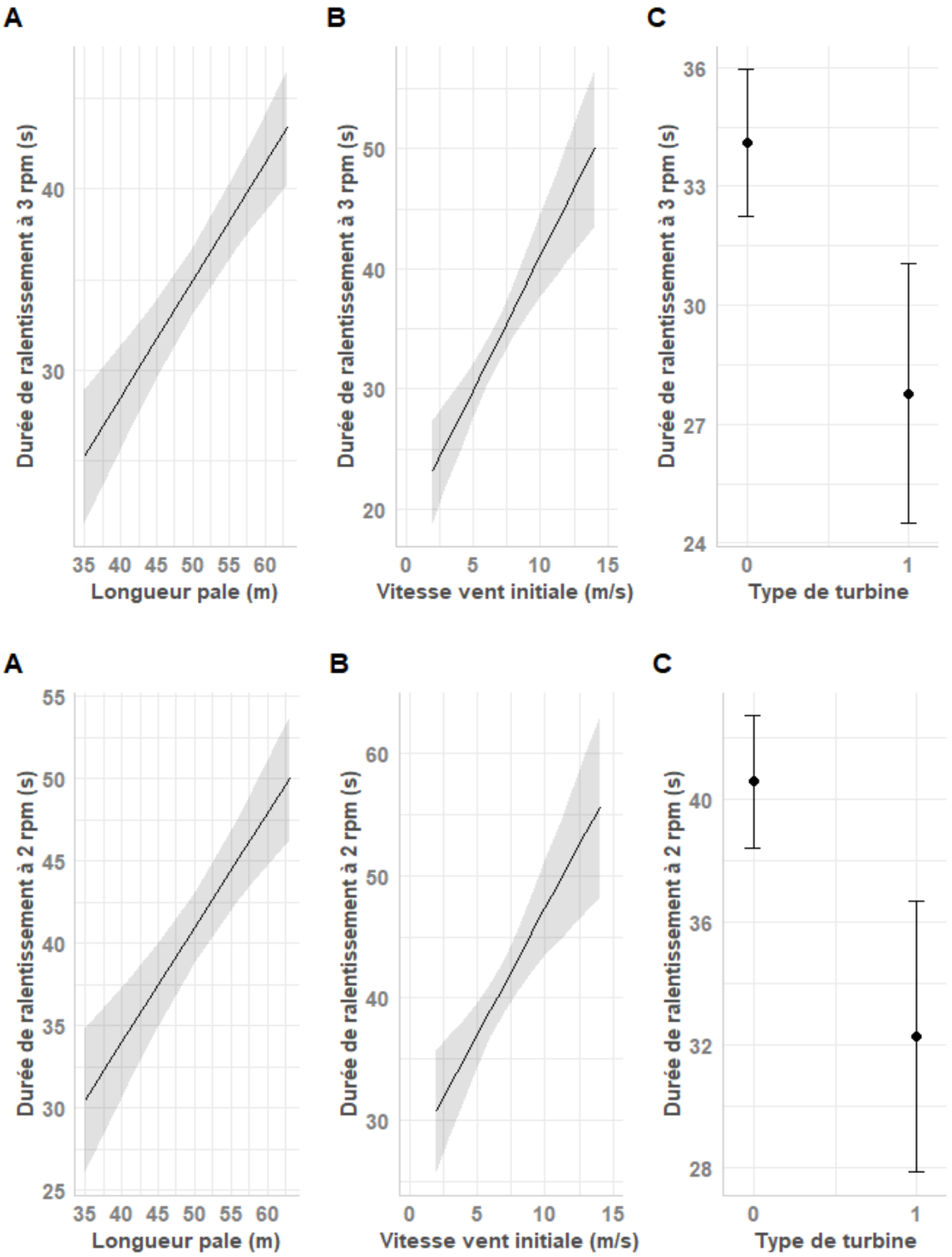

Figure 4. Durées nécessaires pour que la vitesse de rotation résiduelle du rotor soit égale ou inférieure à 3 rpm (haut) et à 2 rpm (bas) au cours des 90 secondes de test en fonction de A) la longueur de pale, B) la vitesse de vent initiale, et C) le type de turbine (0 = asynchrone, 1 = synchrone). Les zones grisées représentent les intervalles de confiance à 95% des estimations. Le modèle incluant une interaction, chaque variable qui n'est pas représentée est fixée à sa moyenne, et le type de machine est asynchrone.

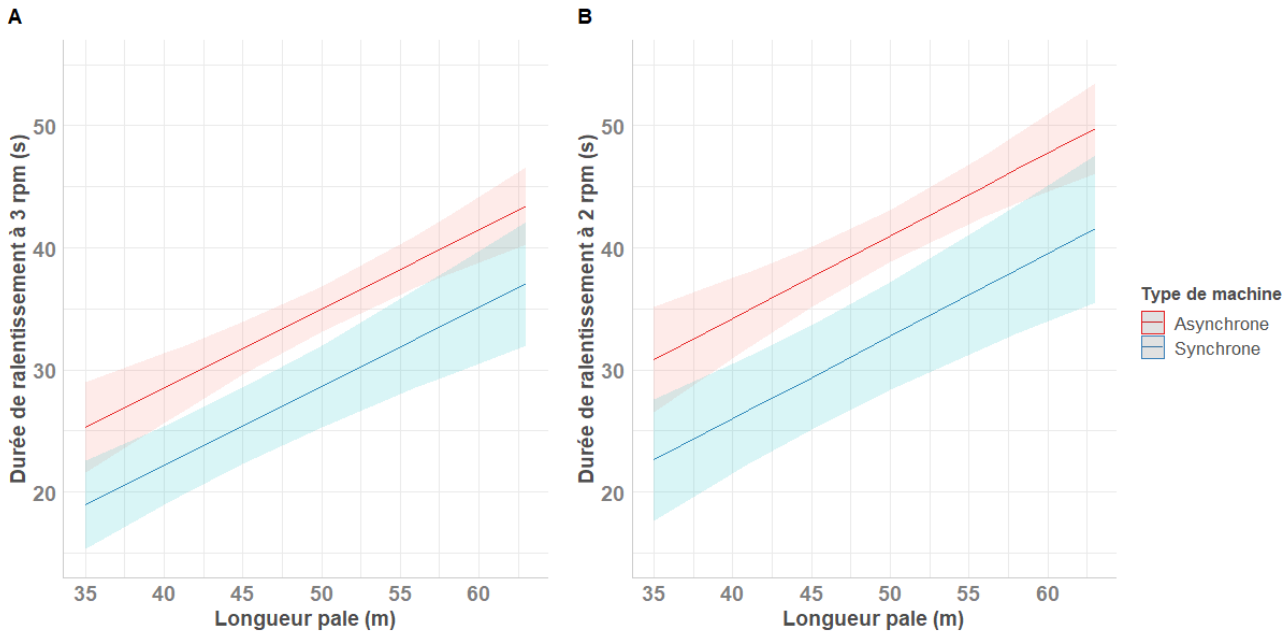

Figure 5. Durée nécessaire pour que la vitesse de rotation résiduelle du rotor soit égale ou inférieure à A) 3 rpm et B) 2 rpm au cours des 90 secondes de test en fonction de la longueur de pale et du type de turbine. Les zones rouges et bleues représentent les intervalles de confiance à 95% des estimations pour les machines asynchrones et synchrones, respectivement. Le modèle incluant des interactions, la vitesse du vent est fixée à sa moyenne pour ces figures.

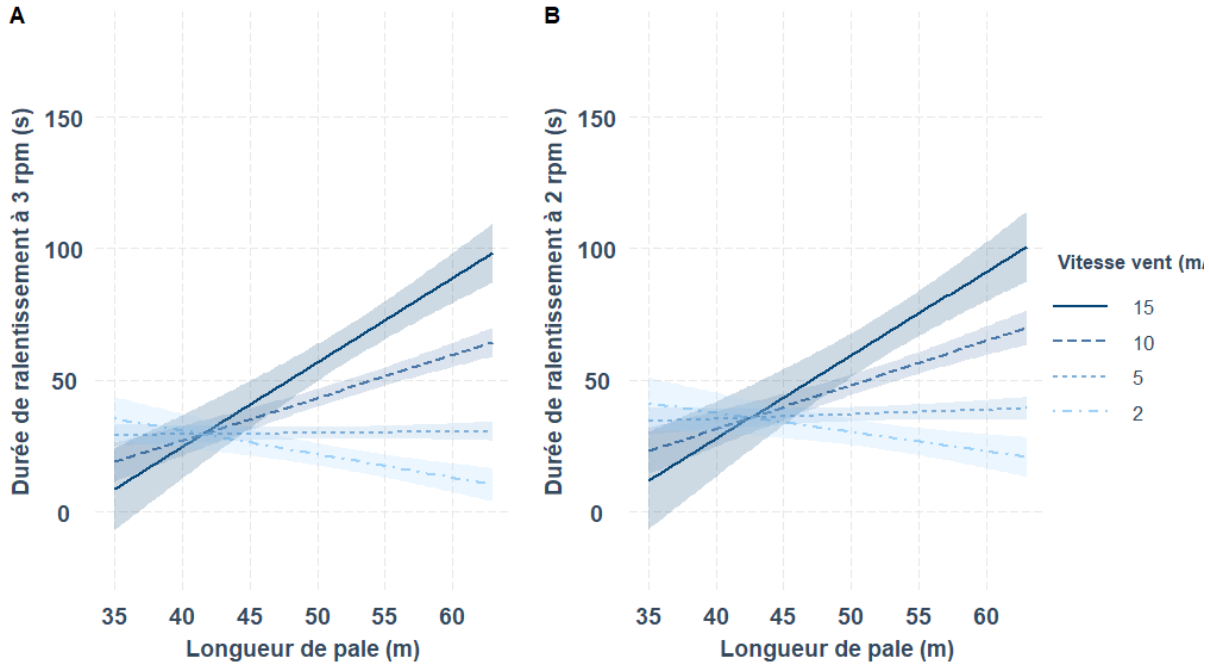

Figure 6. Durées nécessaires pour que la vitesse de rotation résiduelle du rotor soit égale ou inférieure à A) 3 rpm et B) 2 rpm au cours des 90 secondes de test en fonction de la longueur de pale et de la vitesse de vent initiale, pour des machines asynchrones. Les zones grisées représentent les intervalles de confiance à 95% des estimations.

Conclusion

Les tests d'arrêt des turbines réalisés par les opérateurs partenaires du projet MAPE montrent que globalement les éoliennes synchrones peuvent être arrêtées plus rapidement que les éoliennes asynchrones. La différence est de l'ordre de 5 à 10 secondes. Les durées moyennes de ralentissement pour atteindre les valeurs seuils de 3 et 2 rpm sont, sur l'ensemble des tests réalisés, respectivement de 32 et 39 secondes respectivement. Cependant ces valeurs dépendent à la fois de la longueur des pâles, de la vitesse de vent initiale et surtout de l'interaction entre ces deux variables. Les analyses montrent par exemple qu'avec des vents de 10 m/s et de grandes pâles, ces durées peuvent passer à des valeurs de 50 sec, voire à presque 100 sec pour des vitesses de vent de 15 m/s.

Perspectives

Les résultats obtenus sont intéressants et ne sont pas complètement conformes aux attendus. Cependant les déséquilibres qui existent dans le jeu de données (machines asychrones testées plus fréquemment dans des conditions de vent faible que les machines synchrones par exemple) impliquent de considérer avec prudence ces résultats. Aussi, il nous apparait comme essentiel de réaliser davantage de tests pour mieux élargir la couverture des gradients des variables et équilibrer les combinaisons de variables testées (par exemple tester plus de machines asynchrones dans des conditions de vents fort ou au contraire des machines synchrones dans des conditions de vent faible). Ceci permettra à la fois d'améliorer la fiabilité de la modélisation des probabilités et des durées de ralentissement du rotor mais aussi d'augmenter la précision des estimations. L'objectif initial était de tester s'il y avait des différences entre marques sur les temps de ralentissement des éoliennes. Ce test n'est actuellement pas possible car il n'y a souvent que très peu de modèles testés pour une même marque. L'effet marque est alors confondu avec les caractéristiques des machines testées. S'il s'avérait que cet effet marque était important à prendre en compte, il serait utile par exemple de réaliser de nouveaux tests sur des turbines présentant une plus grande hétérogénéité de longueurs de pale au sein de la même marque (Fig. 3A). Il pourrait s'agir par exemple de tester des turbines Enercon et Senvion avec de plus grandes pales, comprises en 45 et 60 m, si de tels modèles existent (et inversement pour les turbines Siemens, et dans une moindre mesure, Nordex).

D'autre part, peu de machines synchrones ont été testées jusqu'à présent (Annexe 2). Dans un souci de bonne représentativité des données, il est essentiel de réaliser de nouveaux tests sur ce type de machine, notamment sur des modèles avec de grandes pales (Fig. 2A). Les résultats contre-intuitifs quant aux durées de ralentissement plus longues pour les machines asynchrones que pour les machines synchrones pourraient en effet s'expliquer par la faible représentativité de ces dernières dans le jeu de données.

En ce qui concerne les conditions aérologiques, il est également essentiel que de nouveaux tests soient réalisés en présence de vents supérieurs à 10 m/s, en particulier pour les turbines Enercon et Senvion, et sur des machines asynchrones.

De façon générale, il apparaît donc essentiel de réaliser des tests pour des combinaisons variées de conditions expérimentales – incluant le modèle de turbine (marque et longueur de pale), le type de machine et la vitesse du vent afin de rendre ces résultats plus fiables dans le futur. Si de tels tests peuvent être mis en œuvre au fil de l'eau, nous pourrons mettre à jour les analyses et l'application régulièrement.

Annexe 1

Protocole « durée ralentissement/arrêt rotor » destiné aux opérateurs éoliens

Projet MAPE — Mai 2021

Julie FLUHR & Alexandre CORBEAU

Dans le cadre du projet MAPE, un de nos objectifs est de déterminer les distances de détection minimales des oiseaux nécessaires pour éviter les mortalités. Cette distance de détection dépend principalement de la vitesse de vol de l'oiseau, du temps de détection/classification par les systèmes de détection, et du temps de ralentissement/arrêt du rotor. L'impact final sur les oiseaux dépend de la vitesse résiduelle des pales. La vitesse des oiseaux est analysée dans le cadre du post-doctorat de Julie Fluhr. Le temps de détection/réaction sera évalué à travers le protocole du WP4 en cours de définition dans le cadre du post-doc d'Alexandre Corbeau. Dans ce cadre, il nous manque donc le temps de ralentissement/arrêt du rotor qui sera évalué localement sur chaque parc lors du protocole d'évaluation des systèmes de détection/réaction. De façon à déterminer les distances de détection minimales des oiseaux (WP3 R3) et d'évaluer ces distances (WP4), il est nécessaire de connaître les temps de ralentissement/arrêt du rotor par modèle d'éolienne et par classe de vents. Nous avons contacté 5 référents turbiniers dans l'objectif de recueillir ce temps de ralentissement/arrêt du rotor en fonction du modèle de turbine et de la vitesse du vent. Cependant, nous n'avons pu obtenir que très peu d'information, car les tests réalisés sont rares à ce jour. Il est possible que certains bureaux d'étude aient réalisé des tests, mais cela sera en nombre limité, sur un nombre restreint de parcs et donc dans des situations locales. Pour combler ce manque, il nous est nécessaire de mobiliser l'ensemble des participants au projet MAPE et notamment les exploitants participants au financement, à travers une expérimentation simple, déclinée sur un ensemble de parcs et d'éoliennes. La mobilisation des partenaires présente l'avantage de permettre une remontée d'information du terrain en nombre, dans des situations variées, permettant l'établissement de statistiques robustes tout en ne mobilisant que faiblement chaque exploitant.

Aussi, nous vous sollicitons aujourd'hui pour mettre en œuvre un protocole simple qui permettra non seulement de combler ce manque de données, mais également de mesurer la vitesse de rotation résiduelle du rotor.

Ce protocole se décline en 2 versions, présentées en détail ci-dessous :

- P1 (version optimale à privilégier) : enregistrement/extraction des données à la seconde via la SCADA
- P2 (version de secours si la P1 n'est pas réalisable) : relevé manuel des données toutes les 5 secondes

P1 (version optimale)

Étapes :

1) Renseigner
   - Le modèle de l'éolienne (Modele_turbine)
   - La hauteur nacelle en mètres (Hauteur_nacelle_m)
   - La longueur de la pale en mètres (Longueur_pale_m)

2) Lancer la commande « arrêt du rotor » via le SCADA et noter impérativement l'heure précise (à la seconde près) du lancement de cette commande (=t0)

3) Via le SCADA, enregistrer la vitesse du vent et la vitesse de rotation du rotor (rpm ou $m.s^{-1}$ en bout de pale) **pour chaque seconde, pendant 1 minute 30 (soit 90 secondes).**

4) Extraire les données depuis le SCADA dans un tableau de type Excel/CSV : depuis l'heure (t0) de lancement de la commande jusqu'à 90 secondes après cette heure (t0+90s) avec au minimum les 3 colonnes suivante : Temps_s (de 0 à 90 secondes), Vitesse_vent_ms, Vitesse_rotation (en rpm et/ou $m.s^{-1}$, en bout de pale).

Le modèle de turbine, la hauteur de la nacelle et la longueur de la pale doivent impérativement être renseignés, dans le même tableau (comme ci-dessous) ou dans un tableau annexe récapitulatif pour chaque test.

Modele_turbine	Hauteur_nacelle_m	Longueur_pale_m	Temps_s	Vitesse_vent_ms	Vitesse_rotation
			t0		
			t0+1s		
			t0+2s		
			t0+3s		
			t0+5s		
			t0+6s		
			t0+7s		
			t0+8s		
			…		
			t0+ 90s		

Ce test doit être réalisé 10 fois pour chaque modèle de turbine possible ET pour trois classes de vent (<10 $m.s^{-1}$, [10 ; 20] $m.s^{-1}$ et >20 $m.s^{-1}$).
Par exemple, pour un modèle d'éolienne d'un turbinier X et de diamètre Y, il s'agit de réaliser 10 tests lorsque la vitesse du vent est inférieure à 10 $m.s^{-1}$ + 10 tests lorsque le vent est compris entre 10$m.s^{-1}$ et 20$m.s^{-1}$ + 10 tests lorsque le vent est supérieur à 20$m.s^{-1}$, soit 30 tests par modèle d'éolienne. Ces 30 tests sont à réaliser sur le plus grand nombre de modèles d'éolienne possible afin d'appréhender au mieux les différentes capacités de l'ensemble du parc éolien français.

Transmettre le tableau de données à julie.fluhr@cefe.cnrs.fr et alexandre.corbeau@cefe.cnrs.fr avant le **30 juin 2021**. Si la classe de vents >20 $m.s^{-1}$ ou un test ou deux n'ont pas pu être réalisés, merci de transmettre néanmoins les données recueillies.

P2 (seulement s'il n'est pas possible d'extraire les données à la seconde du SCADA)

Étapes :

1) Renseigner dans un tableau Excel/CSV (comme l'exemple ci-dessous)
   - Le modèle de l'éolienne (Modele_turbine)
   - La hauteur nacelle en mètres (Hauteur_nacelle_m)
   - La longueur de la pale en mètres (Longueur_pale_m)

2) Renseigner la vitesse du vent (en $m.s^{-1}$) au début du test (t0) (Vitesse_vent_t0_ms)

3) Noter la vitesse de rotation du rotor (en nombre de tours par minute, rpm) **ou** la vitesse de rotation en bout de pale (en $m.s^{-1}$) au début du test (Temps_s = 0) (Vitesse_rotation)

4) Démarrer le chronomètre au moment précis du lancement de la commande « arrêt rotor » au SCADA

5) Noter la vitesse de rotation instantanée fournie par le SCADA (Vitesse_rotation) toutes les **5 secondes** (Temps_s = 5, 10, 15, ...). Préciser impérativement l'unité de la vitesse de rotation renseignée : rpm ou $m.s^{-1}$ en bout de pale.

6) Arrêter les relevés **1 minute 30** après le lancement de la commande « arrêt du rotor » au SCADA.

Modele_turbine	Hauteur_nacelle_m	Longueur_pale_m	Vitesse_vent_t0_ms	Temps_s	Vitesse_rotation
				t0	
				5	
				10	
				15	
				20	
				25	
				…	
				75	
				80	
				85	
				90	

Ce test doit être réalisé 10 fois pour chaque modèle de turbine possible ET pour trois classes de vent (<10 $m.s^{-1}$, [10 ; 20] $m.s^{-1}$ et >20 $m.s^{-1}$).
Par exemple, pour un modèle d'éolienne d'un turbinier X et de diamètre Y, il s'agit de réaliser 10 tests lorsque la vitesse du vent est inférieure à 10 $m.s^{-1}$ + 10 tests lorsque le vent est compris entre 10$m.s^{-1}$ et 20$m.s^{-1}$ + 10 tests lorsque le vent est supérieur à 20$m.s^{-1}$, soit 30 tests par modèle d'éolienne. Ces 30 tests sont à réaliser sur le plus grand nombre de modèles d'éolienne possible afin d'appréhender au mieux les différentes capacités de l'ensemble du parc éolien français.

Transmettre le tableau de données à julie.fluhr@cefe.cnrs.fr et alexandre.corbeau@cefe.cnrs.fr avant le **30 juin 2021**. Si la classe de vents >20 $m.s^{-1}$ ou un test ou deux n'ont pas pu être réalisés, merci de transmettre néanmoins les données recueillies.

Annexe 2

Récapitulatif des tests réalisés dans le cadre du protocole T_{rotor}

Modèle	Marque	Longueur pale (m)	Hauteur nacelle (m)	Type de machine	Nb tests vent < 10 $m.s^{-1}$	Nb tests vent [10-20] $m.s^{-1}$	Nb tests vent > 20 $m.s^{-1}$	Nb total tests
N90	Nordex	45	80	Asynchrone	3	0	0	3
N100	Nordex	50	80	Asynchrone	3	1	0	4
N117	Nordex	58.5	91	Asynchrone	15	0	0	15
V100	Vestas	50	80	Asynchrone	10	0	0	10
N117	Nordex	58.5	91	Asynchrone	7	3	0	10
MM82	SENVION	41	60	Asynchrone	10	0	0	10
MM82	SENVION	41	80	Asynchrone	8	2	0	10
V80	Vestas	40	60	Asynchrone	10	0	0	10
V100	Vestas	50	80	Asynchrone	10	0	0	10
V126	Vestas	63	117	Asynchrone	10	0	0	10
E70	Enercon	35	80	Synchrone	5	7	0	12
E82	Enercon	41	59	Synchrone	7	8	0	15
SWT113	Siemens	56.5	99.5	Synchrone	8	0	0	8
E82	Enercon	41	78	Synchrone	7	3	0	10
				TOTAL	**113**	**24**	**0**	**137**

Annexe 3 - Matrice de corrélation des variables explicatives potentielles de la vitesse de ralentissement des rotors
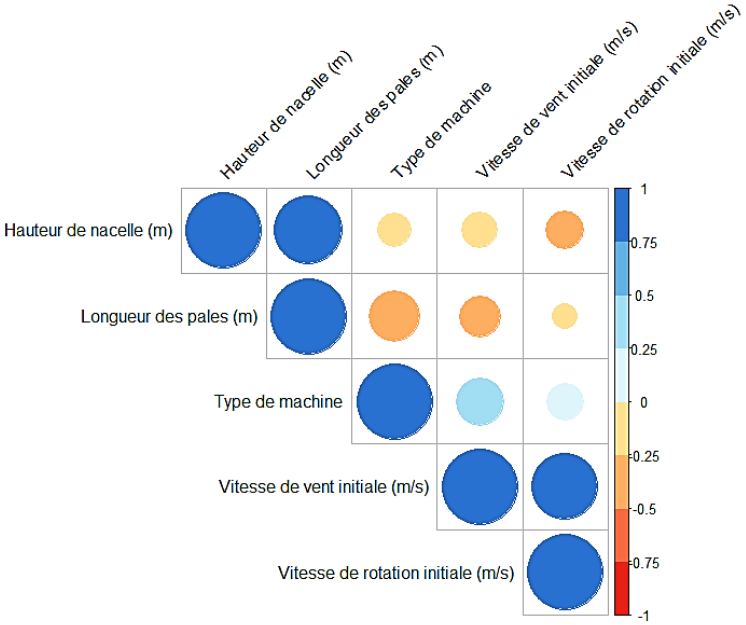
Figure S3. Corrélogramme des variables explicatives concernant les probabilités et les durées de ralentissement des turbines. Les couleurs et la tailles des points indiquent la valeur du coefficient de corrélation : les couleurs plus denses et les points plus gros indiquent les variables très corrélées, positivement (couleurs froides) ou négativement (couleurs chaudes)