



# Régulation Intelligente Des Éoliennes : un dispositif gagnant-gagnant basé sur des algorithmes d'optimisation du compromis entre production d'énergie et risques de collisions avec la faune volante (BRIBAT)

**Kévin Barré** (CESCO/MNHN & Université du Luxembourg)

Fabien Claireau, Anne-Constance Comau, Anaïs Pessato, Andréas Ravache, Elise Sivault, Cassandre Treyvaud, Fabien Verniest, Christian Kerbiriou

Ajouter une photo ou im

SOUTIENS INSTITUTIONNELS



## Contexte

- Croissance exponentielle de l'énergie éolienne
- Impacts sur la faune volante très étudiés : mortalités et pertes d'habitat
- Des estimations du nombre de mortalités comparables entre pays (à puissance installée égale) : des chiffres qui semblent colossaux



300 000/an   
500 000/an  



## Contexte

- Croissance exponentielle de l'énergie éolienne
- Impacts sur la faune volante très étudiés : mortalités et pertes d'habitat
- Des estimations du nombre de mortalités comparables entre pays (a puissance installée égale) : des chiffres qui semblent colossaux
- Plusieurs études suggèrent de fortes conséquences démographiques (sur des espèces protégées), pouvant remettre en question la viabilité des populations (ex : Frick et al., 2017)

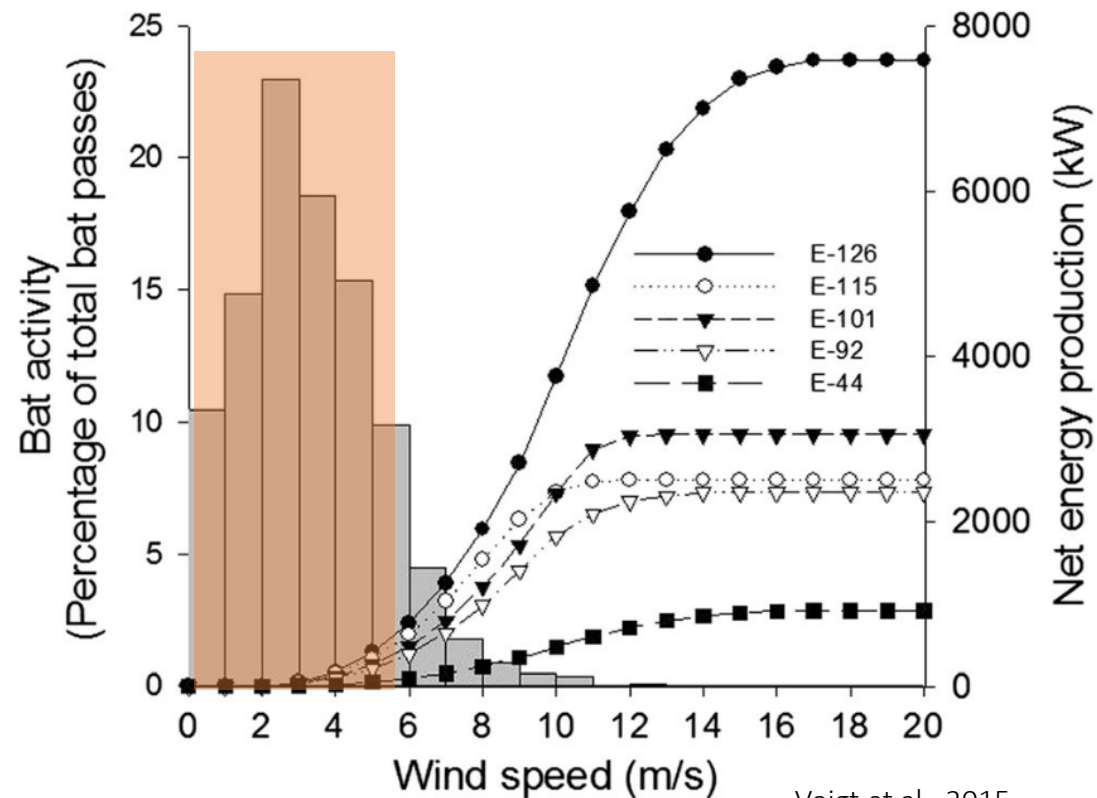


## Contexte

- Solution la plus efficace : éviter les habitats trop favorables (recommandations européennes et nationales, nombreux articles scientifiques)
- Cet évitement est la plupart du temps insuffisamment appliqué (Barré et al., 2022)
- La mesure de réduction en recourt la plus efficace consiste à arrêter les éoliennes dans les conditions climatiques trop favorables aux chiroptères et lorsque la production d'énergie est faible : **bridage**

## Contexte

- Principe du **bridage conventionnel** : arrêt des éoliennes lorsque le vent est inférieur à 6-5m/s et la température > 9-11°C



Voigt et al., 2015




## Contexte

- Principe du **bridage conventionnel** : arrêt des éoliennes lorsque le vent est inférieur à 6-5m/s et la température  $> 9-11^{\circ}\text{C}$
- Efficacité très variable, et nécessitant d'importantes pertes de production pour obtenir un haut niveau de réduction des mortalités (ex 90%) (Whitby et al., 2021)
- Deux types de bridages plus sophistiqués existent/sont possibles : le **bridage acoustique** (Rabie et al., 2022) et le **bridage algorithmique** (une seule étude peer-review publiée; Barré et al., 2023)

## Contexte

- Un seul article publié au sujet des algorithmes de bridage, suggérant une supériorité par rapport au bridage conventionnel


Science of the Total Environment 866 (2023) 161404



Contents lists available at [ScienceDirect](#)

### Science of the Total Environment

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/scitotenv](http://www.elsevier.com/locate/scitotenv)



Drivers of bat activity at wind turbines advocate for mitigating bat exposure using multicriteria algorithm-based curtailment



Kévin Barré<sup>a,b,\*</sup>, Jérémy S.P. Froidevaux<sup>a,b,c,d</sup>, Alejandro Sotillo<sup>a,b</sup>, Charlotte Roemer<sup>a,e</sup>, Christian Kerbirou<sup>a,b</sup>





## Contexte

- Un seul article publié au sujet des algorithmes de bridage, suggérant une supériorité par rapport au bridage conventionnel
- **Cependant, les modalités optimales de construction et d'usage de ces algorithmes pour les rendre opérationnels restaient non étudiées**



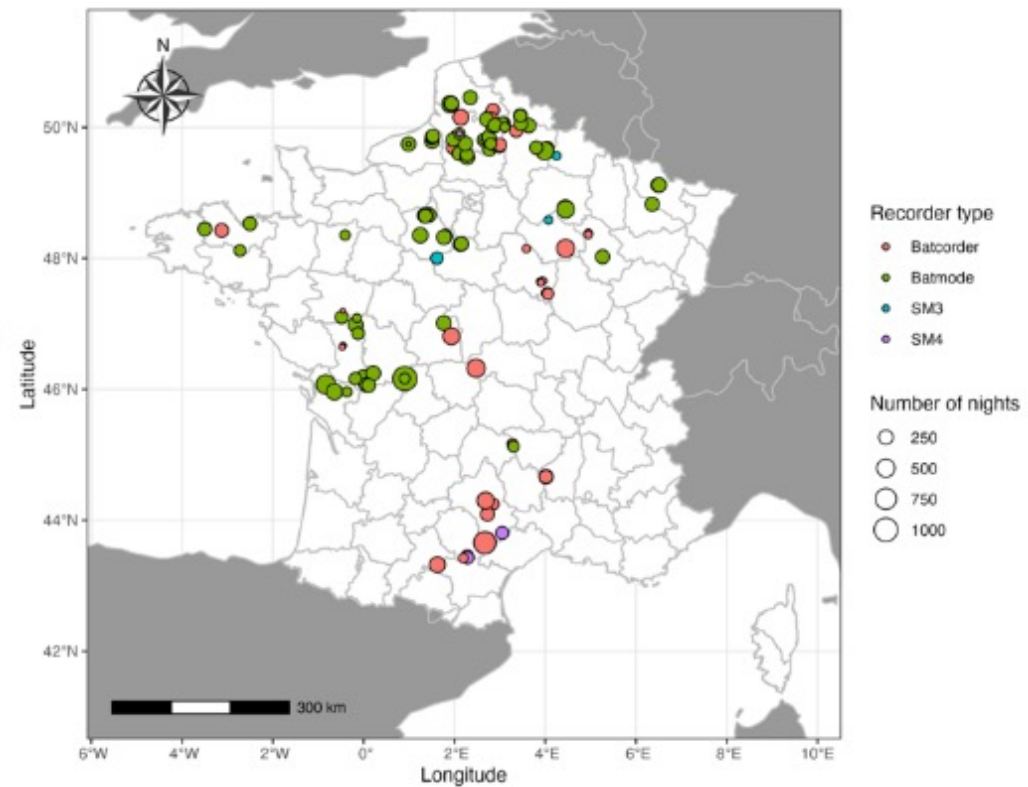
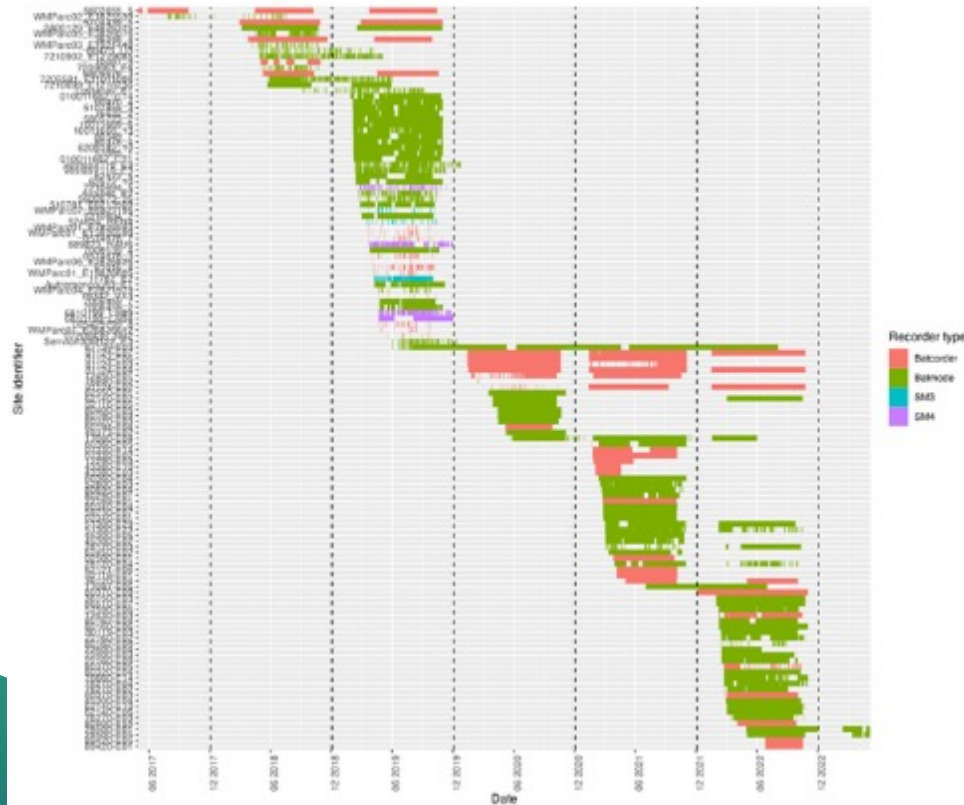
## Question de départ et objectifs du projet

- **Comment entraîner et utiliser les algorithmes de sorte à optimiser leur efficacité pour le bridage des éoliennes visant à protéger les chiroptères?**
  - Evaluer la nécessité ou non d'inclure des données spécifiques au site visé à l'entraînement des modèles
  - Evaluer si l'algorithme doit être utilisé à partir de données d'observation météo en temps réel ou passées
  - Evaluer la résolution taxonomique requise, et de quelle façon le seuil de bridage doit être fixé

# Méthodologie

## Données de suivi acoustique en nacelle

- 123 sites, 25588 nuits, 96393 détections de chauves-souris



# Méthodologie

## Entraînement des modèles

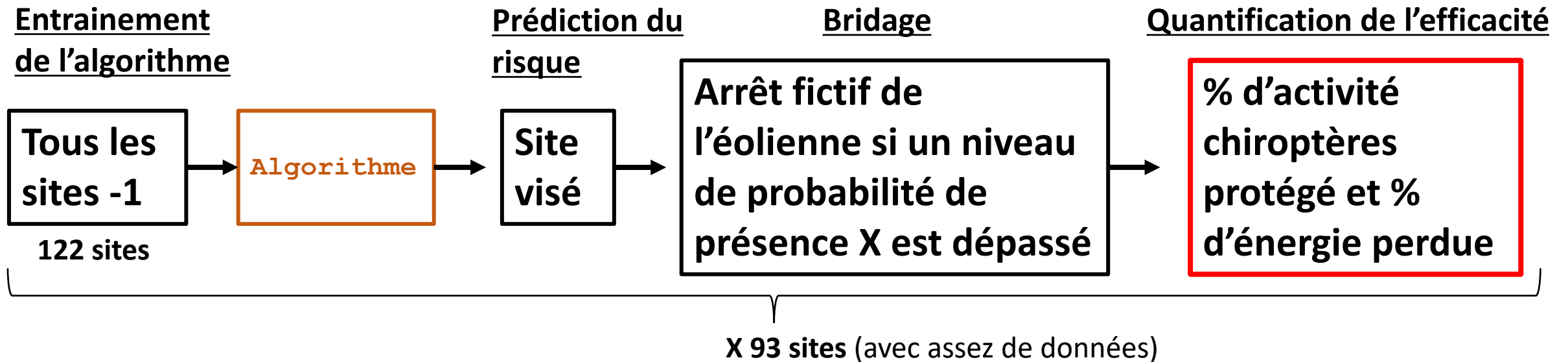
- 1 modèle par guildes à risque de collision (MRE=Pipistrelles, LRE=Noctules), visant à prédire la probabilité de présence de chiroptères par tranche de 20min
- Modélisation de la présence/absence à t+1 en lien avec les facteurs environnementaux constatés à t0, pour coller avec la logique de bridage terrain

Presence/absence  $t+1$   $\sim$  Variables environnementales  $t+0$  + (1|Année)  
+ (1|Matériel)  
+ (1|Site)



# Méthodologie

Simulation d'un bridage sur la base des algorithmes obtenus : principe général

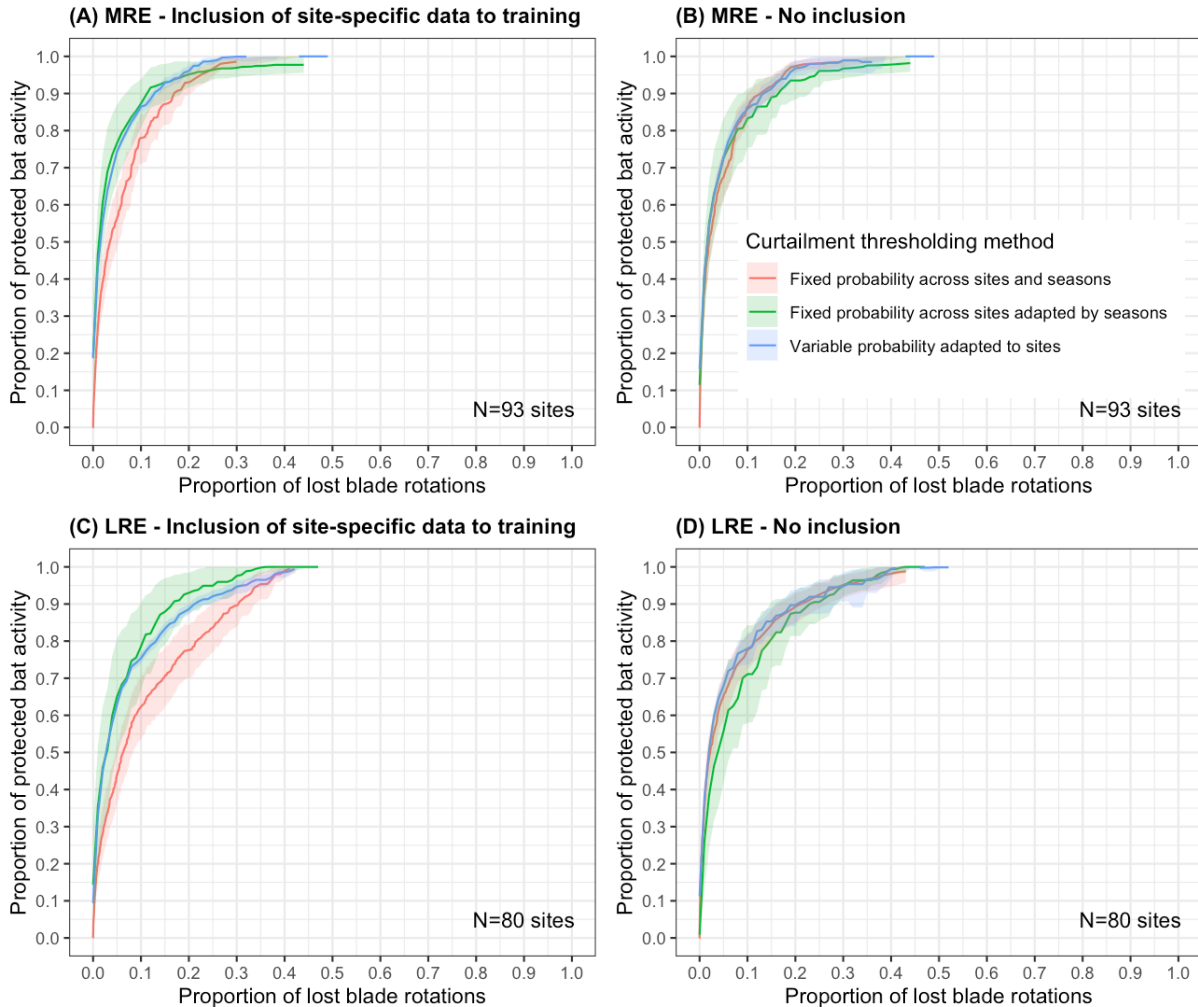


## Simulation déclinée pour différents scénarios :

- Inclusion ou non de données du site visé à l'entraînement
- Probabilité seuil définie de façon nationale, par saison, ou par site
- Décision de bridage guilde par guilde ou les deux combinées
- Données météo temps réel vs passées

# Principaux résultats

Inclusion ou non de données du site, et façon de définir la probabilité seuil de bridage



La méthode d'entraînement n'incluant pas de données spécifiques au site à l'entraînement des modèles, combinée à un seuil de bridage défini nationalement, produit au moins un aussi bon résultat que les autres méthodes

# Principaux résultats

Inclusion ou non de données du site, et façon de définir la probabilité seuil de bridage

Bat guild	Threshold definition method	Protection level	Site-specific data in training	Estimated annual energy loss Sites with energy data (N=13)
LRE	national	0.9	inclusion	0.199 (0.076-0.212)
LRE	national_season	0.9	inclusion	0.124 (0.029-0.178)
LRE	site	0.9	inclusion	0.118 (0.101-0.130)
LRE	national	0.9	none	<b>0.076 (0.046-0.103)</b>
LRE	national_season	0.9	none	0.130 (0.035-0.178)
LRE	site	0.9	none	0.107 (0.059-0.136)
LRE	national	0.95	inclusion	0.204 (0.126-0.215)
LRE	national_season	0.95	inclusion	0.166 (0.047-0.208)
LRE	site	0.95	inclusion	0.160 (0.130-0.166)
LRE	national	0.95	none	<b>0.123 (0.066-0.150)</b>
LRE	national_season	0.95	none	0.178 (0.077-0.202)
LRE	site	0.95	none	0.160 (0.071-0.237)
MRE	national	0.9	inclusion	0.078 (0.037-0.098)
MRE	national_season	0.9	inclusion	0.058 (0.010-0.251)
MRE	site	0.9	inclusion	0.058 (0.053-0.069)
MRE	national	0.9	none	<b>0.052 (0.038-0.092)</b>
MRE	national_season	0.9	none	0.128 (0.010-0.251)
MRE	site	0.9	none	0.064 (0.053-0.069)
MRE	national	0.95	inclusion	0.098 (0.072-0.117)
MRE	national_season	0.95	inclusion	0.230 (0.016-0.251)
MRE	site	0.95	inclusion	0.074 (0.064-0.091)
MRE	national	0.95	none	<b>0.071 (0.052-0.111)</b>
MRE	national_season	0.95	none	0.219 (0.026-0.251)
MRE	site	0.95	none	<b>0.069 (0.064-0.074)</b>

Et cela se confirme pour des niveaux de protection spécifiques.

Les pertes énergétiques estimée sur une année complète de bridage pour protéger 90% des deux guildes sont de 7.6% pour les espèces de haut vol (LRE) et 5.2% pour les espèces de pipistrelles (MRE)

35% de ces pertes peuvent être retranchées en restreignant le bridage à la période avril-novembre sans modifier la protection globale



# Principaux résultats

## Efficacité par guilde et deux guildes combinées

Protection	Gilde	Perte rotation sur période d'étude
0.90	MRE	0.125
0.90	LRE	0.203
<b>0.91</b>	<b>LRE+MRE</b>	<b>0.198</b>

La perte annuelle de rotations de pales n'est pas plus élevée lorsqu'on combine les deux guildes

→ Très bonne nouvelle d'un point de vue opérationnel car dans les faits le bridage devra protéger les deux guildes

# Principaux résultats

## Météo observée en temps réel vs historique

Protection	Guilde	Perte rotation météo temps réel	Perte rotation météo passée
0.90	MRE	0.125	0.160
0.90	LRE	0.203	0.250
<b>0.91</b>	<b>LRE+MRE</b>	<b>0.198</b>	<b>&gt; 0.250</b>

Utiliser une météo moyenne passée fonctionne beaucoup moins bien qu'utiliser la météo en temps réel, car on infère ce qui pourrait se passer sur la base d'une référence passée (cumul d'incertitude)



## Enseignements et implications

L'étude fournit des recommandations pratiques sur la façon d'entraîner et d'utiliser un algorithme de bridage, des éléments jamais étudiés jusqu'ici

Elle bouscule des idées reçues sur la nécessité de calibrer le bridage au site lorsqu'on utilise de très nombreuses données

Résultats encourageants pour un transfert des algorithmes en outils terrain



## Limites, besoins de poursuites et perspectives

Cadre simulatif sur données empiriques, nécessairement moins convaincant pour les parties prenantes qu'un test terrain implémentant l'algorithme (bien que donnant théoriquement le même résultat)

Une phase de test terrain aura lieu avec le soutien de l'ADEME en 2027-2026

# MESSAGES CLÉS

- 1 | Les algorithmes semblent capables de hauts niveaux de protection avec des pertes énergétiques convenables
- 2 | Parmi l'éventail des possibles utilisations, la plus simple à mettre en place est au moins aussi efficace que les plus complexes
- 3 | Les algorithmes devront être utilisés en temps réel avec un dialogue permanent avec la station météo en nacelle
- 4 | Ceci sous-entend de construire une solution technique avec les turbiniers-ingénieurs SCADA pour interfacer l'algorithme (projet ADEME à venir)

Ajouter une photo ou im



MERCI DE VOTRE ATTENTION

Contact : [kevin.barre@mnhn.fr](mailto:kevin.barre@mnhn.fr)

