

COMMUNICATION

Programme OPRECh ciblé sur la régulation des éoliennes en faveur des chauves-souris : analyse des pratiques, tests expérimentaux et voies d'optimisation de la mesure

Yannick BEUCHER, Xavier NARDOU, Frédéric ALBESPY, Aurélie LANGLOIS*,
Florence MATUTINI, Aurélien BESNARD** & Pierre ILLAC***

* EXEN, 116, route de Séverac, 12310 Vimenet – ybeucher@exen.pro

** CEFÉ/CNRS, Campus du CNRS, 1919, route de Mende, 34293 Montpellier – aurelien.besnard@cefe.cnrs.fr

*** TotalEnergies Renouvelables France, Direction Développement - P3E,
1399, avenue Georges-Frêches, 34970 Montpellier – pierre.illac@totalenergies.com

Résumé. - OPRECh est un programme de recherche ciblé sur les processus de dimensionnement, de mise en œuvre et de contrôle de la mesure de régulation des éoliennes en France pour réduire les impacts de mortalité sur les chauves-souris. En l'absence de cadrage ou de synthèse de retour d'expériences à l'échelle nationale, il s'est articulé autour de trois axes. Le premier volet (1) est une démarche de recherche bibliographique destinée à faire un premier bilan de l'état de développement de la mesure à l'échelle nationale et de caractériser les pratiques de l'ensemble du processus de régulation. Il montre que moins de la moitié du parc national bénéficie de cette mesure, mais que la mesure est efficace quand elle est mise en œuvre. Les pratiques sont diversifiées mais tendent à progresser et à s'homogénéiser. Le deuxième volet (2) expérimental teste l'efficacité de différentes modalités régulièrement utilisées et analyse les possibilités de prédiction du risque de mortalité avec une diversité de paramètres. Il confirme une efficacité significative avec les patterns les plus régulièrement utilisés et valide l'utilisation de certaines variables comme pertinentes pour prédire le risque. Le troisième volet (3) synthétise les résultats sous forme de contraintes, leviers et recommandations. Il invite les acteurs vers des pratiques et des principes en faveur d'une systématisation rapide et à large échelle du développement de cette mesure et vers différents leviers d'optimisation.

Mots clefs. - éoliennes, chauves-souris, impacts par mortalité, mesure de régulation, recommandations

Abstract. - OPRECh is a research program targeted on processes of sizing, implementation and control of wind turbine curtailment in France to reduce fatalities on bats. In the absence of framework or feedback at the national scale, OPRECh has been structured around three parts. The first part (1) is a large review of specialized literature for an initial assessment of the current stage of development of this measure on a national scale and in order to characterize practices of the entire curtailment process. It shows that less than half of the French national park is concerned by the mitigation measure. But it is generally effective when it is implemented. This is all the more encouraging as this effectiveness is also limited by problems of effective implementation. Practices are diverse, with regional disparities, but tend to improve and become more consistent. The second experimental part (2) tests effectiveness of different methods regularly used and analyzes possibilities of predicting the risk of mortality with a diversity of variables. It confirms significant effectiveness with the most regularly used patterns and validates the use of certain variables as relevant for predicting risk. The third part (3) summarizes results through a list of constraints, levers and recommendations for the entire curtailment process. It invites stakeholders towards practices and principles in favor of a rapid and large-scale systematization of this measure, and towards several optimization levers.

INTRODUCTION

OPRECh est parti du postulat que les mesures de régulation des éoliennes peuvent permettre de réduire sensiblement les risques de mortalité des Chiroptères. Plusieurs modes de régulations ont ainsi montré leur intérêt en France et à l'étranger ces dernières décennies. Le dimensionnement et la mise en œuvre de ces actions de régulation nécessitent cependant une bonne connaissance de l'écologie des Chiroptères, des conditions de risques

et la maîtrise de contraintes techniques, technologiques et économiques liées au fonctionnement des éoliennes. Or, le manque de connaissances sur ces thématiques en France, l'absence d'état des lieux des pratiques actuelles ou de mutualisation des retours d'expériences, ou encore la communication parfois difficile entre les acteurs de la filière éolienne, ont pu engendrer une mauvaise appréhension de ces modes de régulation, de leurs efficacités relatives pour réduire les mortalités de chauves-souris et leurs effets sur la production d'énergie. Le programme OPRECh vise donc à

comblent (au moins en partie) ces différentes lacunes, vers la connaissance des pratiques en matière de mesures de régulation, vers leur optimisation technique, et vers le partage et la diffusion de recommandations de bonnes pratiques.

OPRECh vise trois objectifs distincts à l'origine de trois volets d'études complémentaires.

Volet 1/ Identifier des pratiques de la mesure de régulation en France pour proposer un premier état de l'art de la situation nationale de la régulation et de la diversité des pratiques. Ce travail se base sur une vaste revue de la littérature spécialisée et d'interviews. Il s'agit de décrire les pratiques et d'identifier les contraintes qui limitent le bon dimensionnement et la bonne mise en œuvre de la mesure de régulation pour l'ensemble des acteurs de la filière. Il s'agit alors de décliner ces pratiques sur une échelle temporelle par une analyse de l'évolution des pratiques en fonction de l'évolution des prescriptions techniques nationales et sur une échelle géographique, par une analyse des disparités ou convergences au niveau des différentes régions de France.

Volet 2/ Tester les principaux modèles de régulation des éoliennes sur un parc éolien jugé « à risque » pour les Chiroptères afin d'évaluer aussi objectivement que possible leurs efficacités, leurs avantages et les contraintes qu'ils imposent, et cela en fonction des espèces concernées, de leurs comportements, des types de risques (espèces de lisière ou de haut-vol, migrations, pics d'activité autour des rotors...), mais aussi selon les milieux, les conditions climatiques, etc.

Volet 3/ Sur la base des résultats des étapes précédentes, proposer une synthèse de recommandations sur les bonnes pratiques de régulation pour faciliter sa mise en œuvre à large échelle (définition du vocabulaire spécifique, avantages/contraintes des différents modèles, prérequis, processus de dimensionnement, difficultés de mise en œuvre, écueils et résultats escomptés, phases de suivis d'efficacité, mesures correctives, amélioration continue...).

Ces trois volets vont être présentés et discutés ci-après, le volet 3 servant de conclusion à cet article.

VOLET 1 : IDENTIFIER LES PRATIQUES DE LA RÉGULATION DES ÉOLIENNES EN FAVEUR DES CHAUVES-SOURIS EN FRANCE

Matériel et méthodes

En l'absence d'information de synthèse disponible à l'échelle nationale à propos des pratiques de la régulation, une combinaison de différentes méthodes et sources de données a été exploitée. Cette phase de recueil de données s'est appuyée sur des recherches bibliographiques, des mailings et consultations d'organismes et institutions, des enquêtes, interviews et le recueil et l'analyse de nombreux rapports d'études. Au vu de la diversité des sources de données et des objectifs de traitement des données, un travail de tri, d'harmonisation et de saisie a été mené en fonction du type de données pour générer finalement trois principales bases de données (BDD), dont les objectifs d'analyses sont complémentaires.

La base de données « BDD Taux de régulation national »

a été créée de manière à disposer d'informations simples, mais aussi exhaustives que possible, pour caractériser la situation nationale du taux de parcs éoliens régulés par rapport à l'ensemble du parc éolien français. Cette proportion nationale de parcs régulés/non régulés devait permettre d'évaluer le stade de développement de la mesure en France puisque le taux national des parcs régulés restait en effet inconnu tant au niveau des institutions publiques que des opérateurs éoliens. Un important recueil bibliographique a ainsi été réalisé à partir de tout document susceptible d'évoquer cette mesure au niveau de chaque parc éolien français : arrêtés préfectoraux (AP), arrêtés préfectoraux complémentaires (APC), rapports d'études d'impacts, rapports de suivis d'impacts, avis de la Mission Régionale d'Autorité Environnementale (MRAe), dossiers de dérogations espèces protégées ou tout autre document informatif. La base de données a été créée avec les informations disponibles pour les parcs éoliens construits au 31 décembre 2020 sur la base du Registre national des installations de production et de stockage d'électricité.

Des documents informatifs ont ainsi pu être recueillis pour 732 parcs éoliens des 1 227 parcs recensés à cette date à l'échelle nationale (DOM-TOM inclus), soit 60 % des parcs éoliens du territoire national. Le taux de recueil d'informations est toutefois très variable selon les régions (important pour les régions Occitanie, Bretagne et Pays de la Loire... et beaucoup plus faible pour les régions Normandie, Bourgogne-Franche-Comté).

La base de données « BDD Pratiques de la régulation/projets éoliens » a été créée pour permettre de détailler les pratiques du processus de régulation dans le cadre d'un nouveau projet éolien ou d'un projet de renouvellement (repowering). Les expertises chiroptérologiques des études d'impacts sur l'environnement apparaissent comme la meilleure source de données mais leur accès n'est pas toujours facile puisqu'elles sont rendues publiques à l'échelle locale au moment de l'enquête publique, mais rarement rassemblées à l'échelle départementale ou régionale (hormis via le site projet-environnement.gouv.fr). La base de données a été alors constituée en exploitant un échantillon de 140 dossiers d'études d'impact de projets de parcs récents pouvant être en construction, autorisés ou en instruction au moment de la rédaction de ce rapport. Là encore des disparités d'échantillonnage sont à noter avec une majorité des projets éoliens engagés à cette date en régions Nouvelle-Aquitaine (51 %), Hauts-de-France (19 %) et Grand Est (9 %).

La nature et la consistance des informations liées à la mesure de régulation sont très hétérogènes entre les rapports. La perception du processus a alors été complétée par des entretiens téléphoniques (auprès de représentants de DREALS, bureaux d'étude, porteurs de projets) voire par la consultation de dossiers de demande de dérogation espèces protégées.

La base de données « BDD Pratiques de la régulation/parcs exploités » a été créée pour permettre de détailler finement les pratiques du processus de régulation dans le cadre de parcs éoliens en cours d'exploitation. Pour ce faire, les rapports de suivis environnementaux apparaissent

comme la meilleure source de données. Leur recueil s'est avéré plus efficace que celle des rapports d'études d'impact, notamment grâce à l'aide de nombreuses DREALs ou bureaux d'étude. Le nombre de rapports traités est ainsi bien plus conséquent que celui des études d'impacts avec 559 dossiers de suivis d'impacts concernant 406 parcs éoliens, soit environ un tiers du parc éolien national installé. Certains parcs éoliens font en effet l'objet de plusieurs campagnes de suivis interannuelles. En moyenne, la base de données concerne 1,3 campagnes de suivi annuel par parc. La grande majorité des rapports traités ne concerne qu'une seule campagne de suivi, mais certains parcs ont été suivis sur parfois cinq campagnes annuelles. Les rapports de suivis interannuels sont très intéressants pour apprécier l'évolution des processus de régulation et leur efficacité. Là encore, une hétérogénéité d'échantillonnage géographique est à noter, avec les régions Grand-Est, Bretagne et Occitanie les plus représentées. Les données concernant la mesure de régulation sont souvent plus détaillées au sein de ces rapports qu'au niveau des études d'impacts, ce qui permet une approche plus qualitative des pratiques pour des parcs exploités. Des consultations directes et entretiens avec les représentants des DREALs, bureaux d'études ou porteurs de projets ont aussi permis de compléter l'analyse.

Principaux résultats obtenus sur les pratiques de la régulation en France

Quel est le stade de déploiement de la mesure en France ?

La mesure de régulation des éoliennes en faveur des Chiroptères est déployée sur un peu moins de la moitié des parcs éoliens construits en France jusqu'en 2020, soit 44 % d'après le recensement effectué (fig. 1). Toutefois, des disparités régionales existent quant à l'adoption de cette mesure, avec une prise en compte qui semble plus tardive dans certaines régions (notamment Hauts-de-France, Grand Est) en parallèle de la progression du développement éolien français. Les évolutions des protocoles réglementaires en vigueur et les prescriptions nationales contribuent aussi à la diffusion de cette mesure.

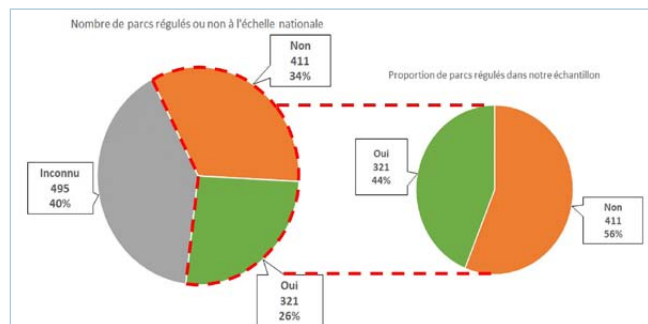


Figure 1. – Proportions de parcs régulés, non régulés ou de statut inconnu en France (gauche) et proportions en excluant les parcs sans information (droite)

En ce qui concerne la dynamique des nouveaux projets éoliens, près de 72 % des études d'impact comportent une proposition de mesure de régulation des éoliennes en faveur

des Chiroptères. Ce recensement a donc mis en évidence une prise d'ampleur progressive des préconisations de la mesure de régulation à l'échelle nationale. Toutefois, des disparités régionales existent et une proportion toujours importante de parcs construits et de projets n'ont pas prévu de mesures de régulation.

Pratiques du processus de régulation

Évolution des suivis d'activité chiroptérologique en hauteur et des mortalités

Le suivi passif et en hauteur de l'activité des chauves-souris s'est développé récemment en France (fig. 2). Dans le cadre des études d'impacts, les prescriptions des guides de l'étude d'impact restent encore peu incitatives mais les pratiques semblent s'être fortement développées depuis 2017-2018. Néanmoins, seuls les parcs les plus récents peuvent bénéficier de cet appui.

Dans le cadre de parcs en exploitation, les pratiques se sont aussi fortement développées ces dernières années, notamment par l'évolution des prescriptions nationales et de la version 2018 du protocole national de suivi environnemental. Compte tenu de ce développement récent, seuls 30 % des études de suivis d'impact de l'échantillon disponible ont pu bénéficier d'une analyse croisée entre suivi d'activité en hauteur et suivi de la mortalité pour décider et dimensionner une mesure de régulation.

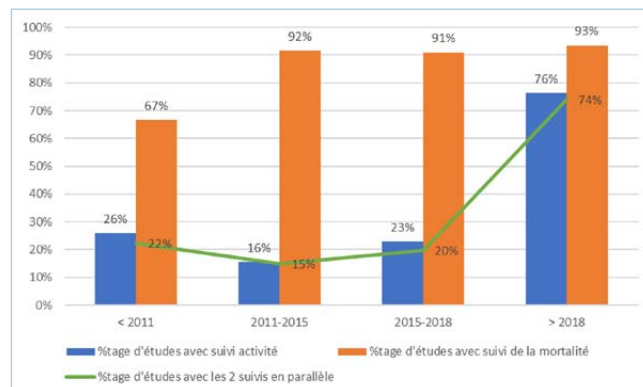


Figure 2. – Histogramme de l'évolution temporelle des principales sources de données du processus de régulation

Pratiques de prise de décision d'une mesure de régulation et modes de régulation retenus

La phase de prise de décision d'engager une mesure de régulation est en forte progression générale ces dernières années (plus de 70 % des études d'impacts et de suivis d'impacts l'envisagent dans les études les plus récentes). Cette progression est probablement liée à l'évolution des prescriptions nationales mais aussi probablement à une prise de conscience plus générale de l'effet cumulé possible du développement éolien sur l'équilibre des populations de chauves-souris.

Par contre, concernant le mode de régulation retenu, on note des incohérences récurrentes avec les sources de données disponibles pour le retenir (fig. 3). C'est notamment le cas de modes de régulation prédictifs qui sont retenus malgré l'absence de suivi en hauteur permettant de qualifier aussi

objectivement que possible les conditions de risques. Le suivi de la mortalité seul ne peut pas permettre cette perception des conditions de risques et donc le dimensionnement d'une mesure de régulation prédictive. Ces incohérences doivent toutefois être modulées par le fait que l'analyse n'intègre pas toujours l'évolution des pratiques dans le temps.

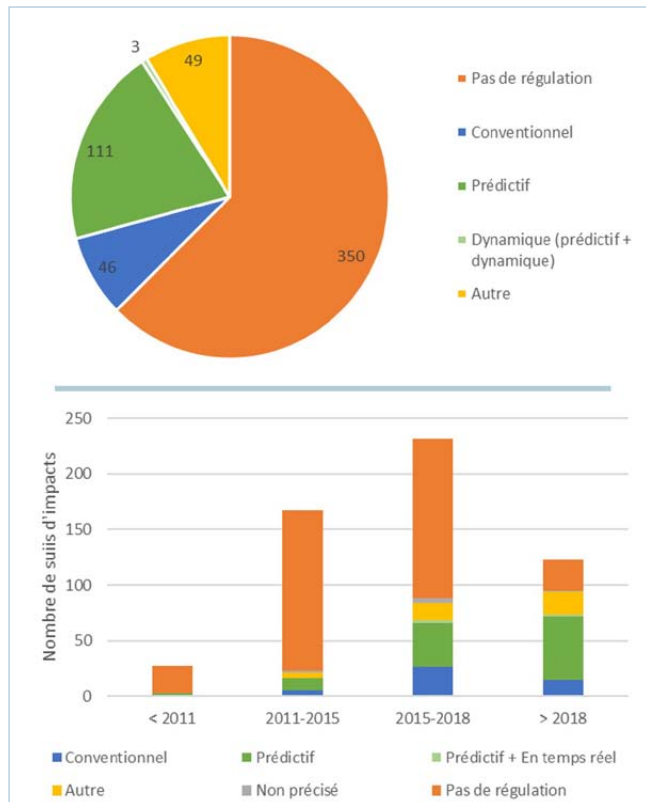


Figure 3. – Proportion et évolution des modes de régulation retenus dans le cadre de suivis d'impacts de parcs exploités

Pratiques du dimensionnement de la mesure de régulation

A propos du dimensionnement du pattern de régulation, l'analyse des pratiques témoigne d'une cohérence des paramètres et des seuils les plus utilisés entre les études d'impacts et les suivis d'impacts. Les patterns retenus semblent globalement de plus en plus conservateurs et de plus en plus fins avec le temps, grâce notamment à la progression des études d'activité en hauteur et la compréhension des processus écologiques et comportementaux associés. Cette évolution se caractérise notamment par :

- des dates de début de période d'activation de plus en plus précoces au printemps (mai-> avril), mais une fin assez stable (octobre) ;
- une durée moyenne de la période d'activation qui progresse (5,2 mois depuis 2018) ;
- un pattern qui tend à être de plus en plus décomposé par saisons et périodes phénologiques ;
- une légère progression du seuil de vitesse de vent en moyenne de 5 vers 6 m/s. Avec la décomposition progressive par saisons, le seuil de vitesse de vent le plus haut sur la période la plus à risque en fin d'été/automne (août-octobre) est de plus en plus distingué

des vitesses moindres retenues plus tôt dans l'année (printemps - début été) ;

- la progression du nombre de paramètres climatiques ou temporels utilisés.

Pour les suivis d'impacts, la mise en œuvre de la mesure au cours d'une première année tend de plus en plus à être revue sur les années suivantes, favorisée par la réglementation pour chercher le meilleur compromis via un renouvellement des suivis tant qu'un « impact significatif » est constaté. Cette phase d'optimisation progressive a pu être renouvelée jusqu'à quatre années successives sur certains sites.

Au-delà de cette progression générale de la précision des patterns de régulation, il reste encore des possibilités pour les affiner, en progressant notamment sur la prise en compte des précipitations. Car l'effet de la pluie sur l'activité des chauves-souris reste peu étudié, faute de connaissance sur les variables les plus influentes et faute de capteurs de suivi adaptés (ex. pluviomètre, hygromètre, visibilimètre...).

Pratiques de suivi/contrôle de la mesure de régulation

L'analyse de l'évolution interannuelle de la mortalité entre deux campagnes est sous-exploitée pour permettre une appréciation de l'efficacité de la mesure (moins de la moitié des rapports). L'analyse de l'évolution interannuelle de l'activité l'est aussi très peu. Lorsque cette analyse est conduite correctement, on note l'absence de constat d'évolution négative de l'activité entre deux années.

Quant aux problèmes de mise en œuvre effective de la mesure, ils sont aussi très peu analysés dans les rapports (1/4) et pourtant ces problèmes semblent courants en pratique (retard de démarrage de la période d'activation en début de campagne, mais aussi dysfonctionnements ponctuels, voire légers décalages fins mais réguliers et encore plus difficiles à identifier) (fig. 4). Ils sont donc sous-évalués dans les études ce qui induit des erreurs évidentes de perception de l'efficacité quantitative ou qualitative de la mesure de régulation. Cela limite donc la possibilité d'optimiser la mesure, que ce soit à l'échelle du parc (mesure corrective) ou de façon plus générale vers une maîtrise des pratiques de la régulation.

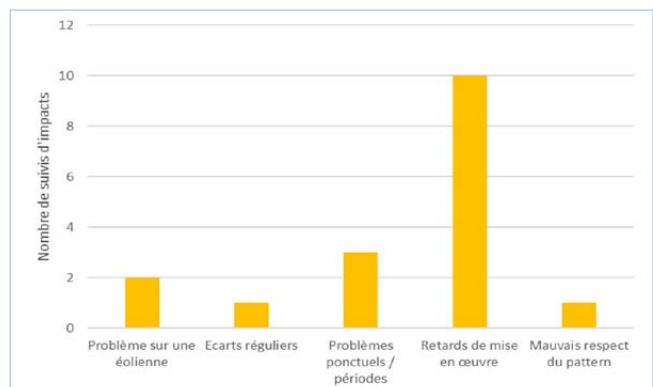


Figure 4. – Typologie des principales causes d'écarts constatés entre le pattern et la mise en œuvre effective de la régulation

Efficacité générale de la mesure de régulation

Les résultats témoignent d'une efficacité notable des

mesures de régulation avec presque 60 % de la réduction de la mortalité par une approche moyenne de l'ensemble des situations des retours de tests disponibles. Ce même taux d'efficacité correspond à des vitesses de vent de l'ordre de 5-6 m/s. Au-delà (6-7 m/s), l'efficacité est très importante et peut aboutir à une maîtrise quasi-totale de l'impact par mortalité (-80 à -100 %) (fig. 5). Attention, les vitesses de vent indiquées ici sont des moyennes sur l'ensemble de la plage de régulation.

Cette efficacité est assez hétérogène selon les sites et selon les critères utilisés pour la mesurer (et probablement selon les espèces, mais ce point n'a pas été testé ici). Globalement, elle est d'autant plus variable :

- que le pattern de régulation se base sur des seuils de vitesses de vent les plus faibles (<4 m/s notamment) ;
- qu'il s'agit de la première année de test de la mesure ;
- que le critère d'analyse est la mortalité pondérée plutôt que le taux de mortalité.

Pour autant, les résultats montrent que même pour des seuils de vitesses de vent faibles, des cas de forte diminution de la mortalité sont possibles et ce, même au cours d'une première année de test. Ce résultat est d'autant plus encourageant dans la perspective d'une maîtrise de la perte de production d'énergie, qu'il est probablement sous-estimé à cause des problèmes de mise en œuvre effective de la mesure.

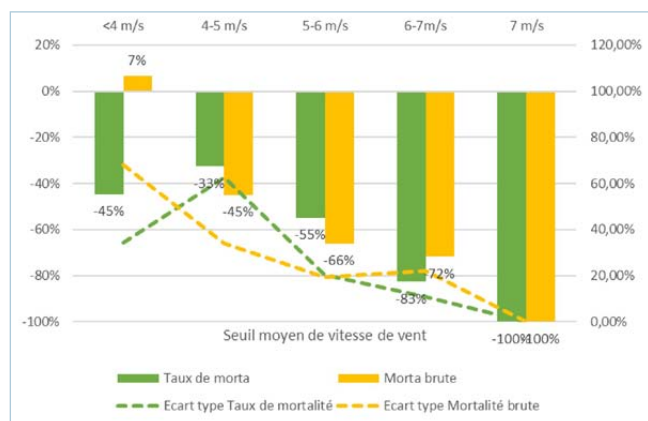


Figure 5. – Évolution de l'impact par mortalité mesuré en moyenne entre avant et après mesure de régulation selon le seuil de vitesse de vent moyen du pattern de régulation

VOLET 2 : TESTER LES PRINCIPAUX MODÈLES DE RÉGULATION (VOLET EXPÉRIMENTAL)

Matériel et méthodes

- Les objectifs du volet expérimental d'OPRECh furent :
- de comparer en conditions réelles l'efficacité de quatre modèles de régulation d'éoliennes définis selon différents seuils de vent et de température sur un parc éolien jugé « à risque » pour les Chiroptères,
 - d'identifier et de hiérarchiser les différents facteurs régissant les taux de mortalité. Différents axes d'analyses visaient alors à :
 - caractériser l'effet des conditions climatiques et du fonctionnement de l'éolienne sur la mortalité ;
 - caractériser l'effet de l'activité au sol et en altitude sur

la mortalité ;

- et caractériser l'effet des conditions climatiques sur l'activité de différents groupes d'espèces.

Quatre modalités de régulation et une modalité témoin (sans régulation) ont été mises en place par paires d'éoliennes avec une rotation aléatoire tous les quinze jours des modalités. La période de tests a été ciblée sur la période de plus forts risques de mortalité sur le parc testé (entre juillet et septembre) et durant deux années successives (2019 et 2020) (tab. 1).

	Vitesse du vent (m/s)	Temp. (°C)	Description générale
Mod01	2	–	Aucune régulation (qui correspond à une très faible rotation sous 2 m/s de vent)
Mod02	3	–	Régulation "sous le seuil de production fictif" : mise en drapeau de l'éolienne lorsque le vent est inférieur à 3 m/s
Mod03	4,5	10	Régulation lorsque la vitesse du vent est inférieure à 4,5 m/s et la température au-dessus de 10 °C
Mod04	6	10	Régulation lorsque la vitesse du vent est inférieure à 6 m/s et la température au-dessus de 10 °C
Mod05	6	15	Régulation lorsque la vitesse du vent est inférieure à 6 m/s et la température au-dessus de 15 °C

Tableau 1. – Description des différentes modalités de régulation étudiées

Pour apprécier au mieux l'effet des modalités de régulation et identifier les principaux facteurs d'efficacité, les suivis d'activité acoustique et de mortalité des chauves-souris ont été engagés sur la base d'un protocole expérimental optimal visant à limiter autant que possible les différents biais méthodologiques et d'échantillonnage. Les relevés de la mortalité ont ainsi été engagés sous toutes les éoliennes du parc sur la base d'une recherche quotidienne y compris week-end et jours fériés. Les relevés d'activité acoustique étaient basés sur l'utilisation de deux enregistreurs à ultrasons par éolienne, positionnés au niveau de la nacelle vers la partie basse du rotor et à la base du mât. Les données météorologiques et de fonctionnement des éoliennes ont également été relevées et prises en compte (vitesse de vent, direction, température, vitesse de rotation des pales, précipitations...).

Les relations entre mortalité et modalités de régulation ont été testées à l'aide d'un modèle linéaire généralisé à effets mixtes (GLMM) (package lme4 sous R) [BATES *et al.* 2021]. La mortalité a été décrite selon deux variables à expliquer :

- le nombre de cadavres détectés ;
- la présence ou absence d'au moins un cadavre par relevé.

La corrélation entre les différentes variables d'activité et la mortalité observée a été testée par des modèles additifs généralisés [GAM, HASTIE AND TIBSHIRANI 1986] à effets aléatoires (GAMM) [LIN AND ZHANG 1999]. Un modèle a été réalisé pour chacune des variables explicatives potentielles puis l'ensemble des modèles ont été comparés sur la base du coefficient de détermination, pseudo-R² ajusté.

Les mêmes analyses statistiques ont été utilisées pour tester l'effet des variables météorologiques et de l'activité

des éoliennes sur la mortalité en remplaçant les variables explicatives (activité) par des variables météorologiques et une variable décrivant le fonctionnement de l'éolienne à l'échelle de la nuit.

L'effet de différentes variables climatiques sur l'activité chiroptérologique a été analysé à l'aide de modèles additifs généralisés à effets aléatoires (GAMM) avec une fonction de lien de type log et une distribution négative binomiale (sur-dispersion des données d'activité) ou une fonction de lien de type logit et une distribution binomiale suivant les métriques utilisées pour quantifier l'activité (données de nombre ou de présence-absence d'au moins un contact).

Principaux résultats des tests expérimentaux des modalités de régulations (volet 2)

Effet des différents modes de régulation sur la mortalité observée

33 cadavres ont été découverts lors de 29 jours de prospection sur les 173 jours effectués entre 2019 et 2020. Parmi ces 33 cadavres, trois (9 %) noctules de Leisler, 21 (64 %) pipistrelles communes (*Pipistrellus pipistrellus*), six (18 %) pipistrelles de Kuhl (*Pipistrellus kuhlii*), une (3 %) pipistrelle de Nathusius et deux (6 %) pipistrelles indéterminées (commune ou pygmée) ont été identifiés. Aucun cadavre n'a été retrouvé sous les éoliennes les plus fortement régulées (mod4 et mod5) (fig. 6).

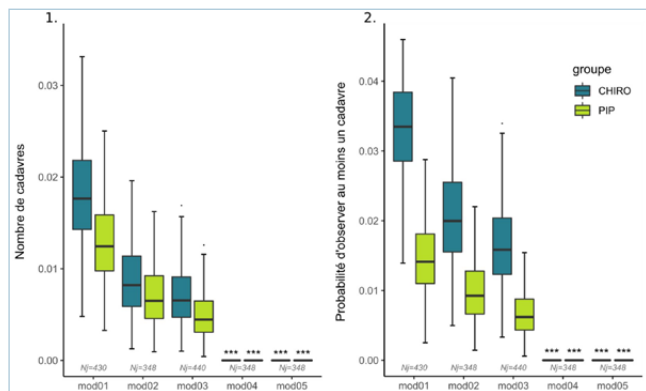


Figure 6. – Distribution des estimations associées aux effets fixes de chaque modalité de régulation testée pour l'ensemble des espèces de Chiroptères (CHIRO) et pour le groupe des pipistrelles (PIP). Ces coefficients issus de GLMM correspondent au nombre de cadavres par nuit prédit (1) et à la probabilité d'observer au moins un cadavre (2) sous une éolienne régulée selon les différentes modalités : mod01 (sans régulation) mod02 (régulation sous 3 m/s de vent), mod03 (régulation sous 4,5 m/s de vent et au-dessus de 10 °C), mod04 (régulation sous 6 m/s de vent et au-dessus de 10 °C), mod05 (régulation sous 6 m/s de vent et au-dessus de 15 °C). N = nombre de cadavres découverts. Nombre de jours de régulation cumulé répartis sur onze éoliennes : mod01 : 430, mod02 : 348, mod03 : 440, mod04 : 348, mod05 : 348. La significativité des comparaisons avec la modalité témoin est représentée au-dessus des groupes concernés (* : $p < 0.05$).

Aucun cadavre n'a été découvert sous les éoliennes bridées lorsque le vent était inférieur à 6 m/s et lorsque les températures étaient supérieures à 10 °C (modalité 4) ou 15 °C (modalité 5). Ces deux modalités sont significativement efficaces pour réduire la mortalité par rapport à des éoliennes non régulées.

Pour les deux autres modalités, le nombre de cadavres estimés diminue par rapport aux éoliennes témoin :

De 56 % lorsque les éoliennes sont mises en drapeau sous un vent de 3 m/s (modalité 2) ;

Et de 61 % lorsque les éoliennes sont mises en drapeau sous un vent de 4,5 m/s et lorsque les températures sont supérieures à 10 °C (modalité 3).

Ces résultats ne sont cependant pas significatifs (intervalles de confiance élevés).

Effet de l'activité chiroptérologiques sur la mortalité

L'activité mesurée à la base et en nacelle permet de prédire une partie des mortalités, mais ces résultats sont sensibles à la métrique d'activité utilisée. Les périodes de forte activité (« pic d'activité ») sont associées à un risque de mortalité plus élevé (fig. 7).

Effet de des variables météorologiques, temporelles et de fonctionnement de l'éolienne sur la mortalité

La mortalité augmente significativement lorsque la température augmente et lorsque la vitesse du rotor diminue.

Effet des variables climatiques sur l'activité

Les variables de température et de vitesse de vent apparaissent comme les deux variables les plus importantes pour expliquer l'activité des groupes CHIRO et PIP au sol et au niveau de la nacelle, suivi de la date et des précipitations. La part de variance expliquée par les modèles est cependant plus faible pour le groupe NOC, soulignant des difficultés à prédire l'activité pour ce groupe d'espèces que ce soit au sol ou en altitude. De plus, les patrons observés varient d'une année à l'autre.

Discussions sur ce volet 2

Peut-on prédire l'activité des Chiroptères à partir de variables climatiques et temporelles ?

La température, la vitesse du vent et le temps (période de l'année) sont des variables pertinentes pour prédire une partie de l'activité à l'échelle de la nuit. Ces résultats sont en accord avec la littérature scientifique et sont cohérents avec l'écologie des espèces étudiées. Cependant, nous observons une diversité de réponses suivant les espèces considérées, avec une difficulté à prédire de manière satisfaisante l'activité des espèces du groupe des noctules. Ceci peut notamment s'expliquer par le caractère arboricole et migrateur de ces espèces associé à des comportements spécifiques à proximité des éoliennes. Ces différents types d'activité (ex. comportements sociaux, chasse et migration) ne sont pas distingués dans les différentes métriques d'activité utilisées, les espèces n'étant pas impactées de la même manière par les variables climatiques et présentant une variation saisonnière importante.

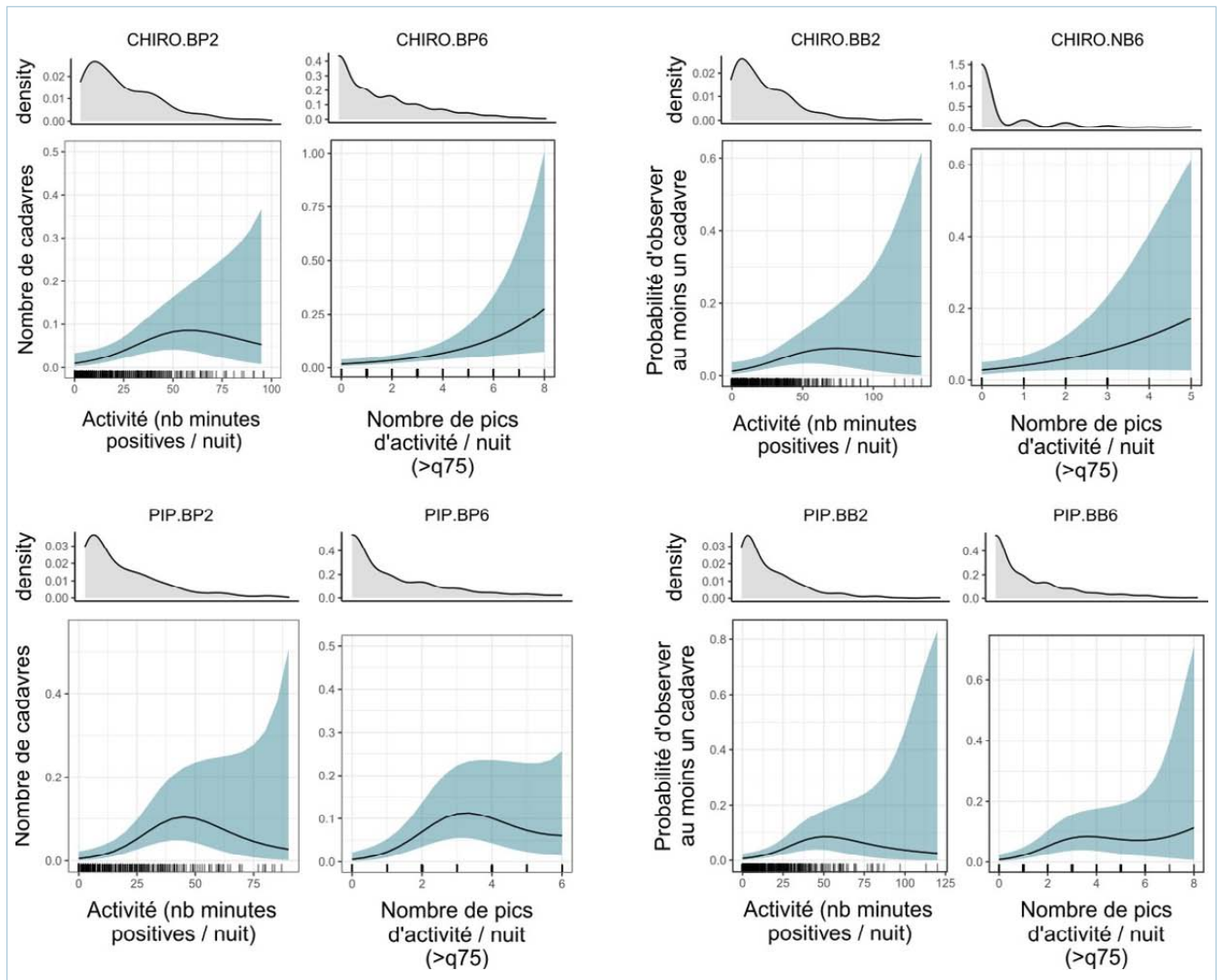


Figure 7. – Effets de l'activité chiroptérologique sur le nombre de cadavres et la probabilité de découvrir au moins une mortalité. Courbes de réponse des huit modèles GAMMs les plus parcimonieux avec effets significatifs. CHIRO : pour l'ensemble des espèces (Ncadavre = 19) ; PIP : pour le groupe des pipistrelles seulement (Ncadavre = 17). Code modèle : première lettre B = activité mesurée à la base de l'éolienne, et N = activité mesurée au niveau de la nacelle ; deuxième lettre : P = poisson ; B = binomial suivi du numéro du modèle (se référer à la Table 3). Les abscisses et les ordonnées des graphiques issues des modèles CHIRO.BP2, PIPBP2 et PIPBB5 ont été ajustées pour améliorer la visibilité (valeurs maximales). La distribution des données utilisées est présentée au-dessus des courbes de réponses.

Un lien partiel mais significatif entre mortalité et activités

Nous avons établi un lien significatif mais partiel entre certaines métriques d'activité (à la base et en nacelle) et la mortalité. Ce lien partiel souligne l'importance d'améliorer la résolution temporelle des données de mortalité, la détectabilité des cadavres et de réduire les biais de détection acoustique. De plus, l'activité mesurée ne permet pas de différencier l'âge et le sexe des individus ni le type d'activité (comportements sociaux, activité de chasse, transit ou migration). Or, certains comportements (ex. interactions sociales en période de reproduction, parades nuptiales des espèces arboricoles) et un manque d'expériences (cas des juvéniles) pourraient être associés à un risque de collision plus élevé. Ces éléments sont des sources de variabilité de l'activité et des risques mortalités difficiles à modéliser à partir des données récoltées.

Simulations de différents pratiques de régulation sur le jeu de données expérimental d'OPRECh

Les investigations du volet 2 ont permis de recueillir un jeu de données expérimentales (activité, mortalité) d'une qualité exceptionnelle. Cela offrait l'opportunité de « mettre en situation » les différents modes de dimensionnement de la mesure de régulation (préventif sous seuil de production, préventif conventionnel, prédictif classique, prédictif sur le modèle standardisé Renebat (KJM), prédictif avec approche qualitative des comportements (EXEN), dynamiques, etc.) afin d'analyser quelle aurait été l'efficacité du conseil promu sur la maîtrise des mortalités pour chacun de ces modes.

Cette rétro analyse a montré que ;

- le mode de régulation préventif sous seuil de production aurait théoriquement permis de réduire sensiblement (-56 %) les mortalités générées par le parc non régulé ;
- les modes de régulation prédictifs, qu'il s'agisse de

la méthode du modèle standardisé Renebat ou de la méthode d'approche comportementale fine, auraient tous deux théoriquement permis de réduire entre 61 et 100 % de la mortalité générée par le parc non régulé, aboutissant en tous cas à une mortalité résiduelle de moins de deux chauves-souris par éolienne et par an (plus proche de 0 pour l'approche comportementale);

- le mode de régulation préventif basé sur les seuils conventionnels de 6 m/s et 10 °C, aurait théoriquement permis d'éviter toute mortalité de chauves-souris.

Evidemment, plus le scénario est conservateur et plus la production d'énergie sera impactée

Simulation de l'effet du choix de la pression de suivi de la mortalité sur la perception de l'impact

La pression de suivi exceptionnelle réalisée dans le cadre du volet 2 (un passage tous les jours pendant trois mois) permet une estimation relativement proche du nombre réel de mortalités (même si potentiellement légèrement sous-estimé). C'était donc l'occasion de simuler statistiquement les résultats qui auraient pu être obtenus pour des pressions de suivi inférieures à une visite par jour (deux visites par semaine, une visite par semaine et quatre visites aléatoires) et de calculer le nombre de mortalités brutes et le taux de mortalité qui auraient été obtenus avec ces différentes pressions de suivi.

Les différents échantillonnages de suivi simulés aboutissent globalement à une surestimation du taux de mortalité par rapport à un taux de mortalité calculé sur la base d'une pression de suivi quotidienne. Cette surestimation est liée aux formules utilisées qui prennent en compte les incertitudes induites par la pression de suivi. Toutefois, plus la pression de suivi est importante, plus les taux de mortalité calculés sont précis et moins dispersés, permettant d'obtenir des résultats exploitables et comparables entre différents parcs éoliens (fig. 8).

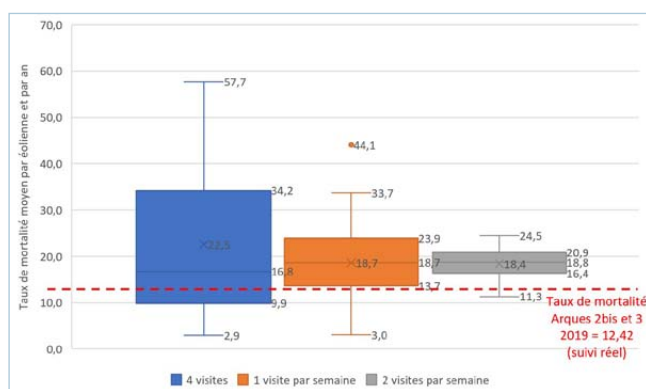


Figure 8. – Taux de mortalité par éolienne et par an simulé pour 100 répliques de différentes pressions de suivi sur Arques 2bis & 3, par rapport au taux de mortalité réel calculé en 2019

Que l'on se fie au nombre de mortalités brutes ou au taux de mortalité, les protocoles de suivi de la mortalité au niveau des parcs éoliens à enjeux chiroptérologiques ont tout intérêt à augmenter la pression selon les sites et périodes à deux visites par semaines pour obtenir des données robustes

et analysables à large échelle. Les prescriptions d'une mesure de régulation des éoliennes en faveur des Chiroptères en seront plus précises et plus adaptées aux enjeux réels perçus sur le site, limitant alors le nombre d'années de suivi de la mortalité nécessaires pour comprendre l'impact réel d'un parc sur les populations de Chiroptères et pour agir de façon proportionnée.

VOLET 3 : CONCLUSION

Contraintes, leviers et recommandations vers une mesure de régulation optimisée en France

Les trois principaux enseignements d'OPRECh vers une systématisation de la mesure en France

Premier enseignement (issu du volet 1) : moins de la moitié du parc éolien national bénéficierait en 2020 d'une mesure de régulation en faveur des Chiroptères;

Deuxième enseignement (issu des volets 1 et 2) : lorsqu'elle est mise en place, cette mesure est globalement efficace pour réduire la mortalité des chauves-souris générée par les éoliennes (réduction de 30 à 100 % des mortalités). L'efficacité est toutefois variable, d'autant plus efficace que l'intensité de régulation est importante et d'autant plus variable que l'intensité de régulation est faible. Les régulations à faible seuils de vent peuvent toutefois être efficaces lorsque bien dimensionnées;

Troisième enseignement (issu du volet 1) : des problèmes de mauvaise mise en œuvre effective de la mesure semblent notables (la moitié des parcs serait concernée) et sous-évalués (1/4 des rapports évoquent ce biais) dans l'analyse de l'efficacité de la mesure. Aussi, si l'efficacité générale de la mesure est déjà importante dans ces conditions, on suppose qu'elle le sera d'autant plus si les problèmes de mise en œuvre sont résolus.

Ces trois enseignements devraient inciter à systématiser la mise en œuvre d'une mesure de régulation pour tous les parcs en exploitation et les nouveaux projets. Car au-delà de la façon dont la mesure est réfléchie, dimensionnée ou mise en œuvre, et malgré les lacunes de connaissance sur l'état des populations, cette généralisation de la mesure aura rapidement un effet massif de réduction des impacts à large échelle sur les populations de Chiroptères [cf. FRIEDENBERG & FRICK, 2021].

Des contraintes générales à lever :

- Systématisation de la mesure sur tous les projets les plus récents,
- Contexte réglementaire de suivi tous les 10 ans à valoriser pour engager ou optimiser les mesures des parcs en exploitation,
- Démarche volontaire et vertueuse possible pour anticiper les échéances réglementaires,
- Envisager la mesure lors d'un projet de repowering pour résoudre les contraintes techniques d'implémentation de la mesure sur les parcs éoliens les plus anciens. Certaines solutions techniques sont parfois aussi possibles sur les parcs les plus anciens,

- Mise en place d'une régulation préventive sous seuil de production pour les parcs non régulés pour des raisons justifiées.
- Retenir des unités de mesure d'activité pertinentes et argumentées,

Des leviers possibles à envisager :

- Renforcer le cadrage, l'accompagnement et les prescriptions techniques à l'échelle nationale et régionale,
- Inciter au développement de groupes de travail et réseaux d'acteurs à l'échelle nationale pour s'accorder, former, partager ces expériences et produire des guides techniques,
- Clarifier le vocabulaire technique,
- Donner aux services de l'État les moyens de suivre la progression du taux de parcs régulés,
- Communiquer pour faire prendre conscience et trouver des solutions de suivis face aux différents problèmes de mise en œuvre effective de la mesure (retard de mise en œuvre en début de campagne, dysfonctionnements ponctuels, problèmes d'horodatages fins, etc.).
- Développer l'utilisation de référentiels d'activité par type de matériel acoustique et de conditions de mise en œuvre, avec une présentation de la définition de ces référentiels,
- Présenter clairement les biais et limites inhérentes aux méthodes de suivis acoustiques,
- Présenter les résultats sous la forme d'une synthèse chronologique d'activité par nuit, par espèces ou groupes d'espèces, utilisée comme campagne d'activité de référence pour le site, avec présentation des seuils du référentiel d'activité associé,

Trois grands principes essentiels à respecter dans les études :

- Principe de transparence et d'argumentation scientifique : la présentation détaillée des résultats et des décisions argumentées doivent revenir au cœur des rapports pour que la réduction d'impact des parcs éoliens sur les chauves-souris s'appuie sur une démarche scientifique.
- Principe d'humilité vis-à-vis de la qualité des études et la progression des connaissances : les connaissances sur l'écologie de vol des chauves-souris en plein ciel et ses facteurs d'influence sont encore limitées. Il est important d'exploiter toutes les données disponibles et d'éviter ou limiter autant que possible toutes démarches conduisant à simplifier ou échantillonner l'information dans les études (ex. pression de suivi, échantillonnage d'analyse de données). Il est aussi conseillé de multiplier les sources d'informations et les critères d'analyse pour prendre des décisions pertinentes.
- Principe de proportionnalité au cas par cas et de recherche de compromis entre l'intérêt des Chiroptères et la production d'énergie : éviter tout préjugé et conclusion hâtive sous prétexte d'un « dire d'expert ». Chaque site doit être traité au cas par cas, sans a priori, avec la recherche constante du meilleur compromis entre la protection des chauves-souris et la production d'énergie, sur la base d'un jeu de données représentatif de la situation du site.
- Réaliser une analyse croisée détaillée de l'effet des différents paramètres climatiques et temporels (vitesse de vent, température, horaires, périodes, précipitations, etc.) sur l'activité chiroptérologique de référence,
- Privilégier des critères d'analyse pertinents, justifiés et variés ; ex. ne pas uniquement se baser sur le pourcentage d'activité « protégé » par la régulation. Seul le niveau d'activité résiduel à risque après mise en œuvre de la mesure devrait permettre de valider ou non la décision de retenir le pattern de régulation.

Recommandations pour la phase de suivi de la mortalité :

- Respecter à minima les protocoles en vigueur en termes de pression de suivi de la mortalité, en privilégiant une pression de suivi à deux visites par semaines sur les périodes les plus à risque, en adaptant les protocoles de suivi à l'aide d'outils adaptés (ex. EolPower),
- Utiliser et présenter les intervalles de confiance pour présenter les résultats d'estimation de la mortalité,
- Privilégier des critères d'analyse justifiés et variés. L'estimation du taux de mortalité par les méthodes et formules standardisées reste le critère de comparaison à la fois réglementaire (cf. protocole de suivi environnemental) et le plus fiable,
- Détailler l'approche qualitative de l'impact par mortalité (espèces, patrimonialité, périodes, phénologies, comportements, effet des conditions climatiques, etc.),
- Analyser l'efficacité d'une mesure de régulation en se basant à la fois sur l'évolution des résultats de mortalité entre avant et après mise en place de la mesure, sur le niveau de mortalité résiduel et sur une approche qualitative des mortalités résiduelles (espèces, enjeux...), et en tenant compte de l'évolution de l'activité,
- Comparer les résultats de mortalité du site avec ceux recueillis à l'échelle locale et régionale pour estimer les effets cumulatifs.

Recommandations pour la phase de suivi de l'activité en hauteur :

- Généraliser le suivi d'activité en hauteur ET en continu (sans échantillonnage). Même si le suivi en hauteur ne permet qu'une perception partielle de l'activité, l'absence de suivi en hauteur exclut toute possibilité de dimensionnement proportionné du pattern de régulation,
- Inciter à développer le suivi d'activité en continu proche du sol en parallèle des suivis en hauteur, notamment pour les parcs à grands rotors et en contextes forestiers, bocagers denses,
- Juger du caractère « significatif » ou « non significatif » de l'impact résiduel des mortalités et donc de l'efficacité de la mesure en se basant à la fois sur :
 - une approche quantitative (évolution des mortalités

Recommandations pour la prise de décision, le dimensionnement et le contrôle de la mesure de régulation :

- Juger du caractère « significatif » ou « non significatif » de l'impact résiduel des mortalités et donc de l'efficacité de la mesure en se basant à la fois sur :
 - une approche quantitative (évolution des mortalités

- avant et après mesure, taux de mortalité résiduel après mesure), dont quelques seuils ont été proposés mais restent à définir par une démarche concertée au niveau national ;
- une approche qualitative (caractère patrimonial et sensible des espèces, statut biologique, effets cumulés à l'échelle de leur domaine vital, etc). Les espèces phares à prendre en compte comme les plus patrimoniales et sensibles pour faire évoluer les conclusions sont notamment les espèces de haut-vol et ou migratrices ;
 - et en tenant compte des résultats d'activité ;
 - Tenir compte des éventuels problèmes de mise en œuvre effective de la mesure qui limitent aussi toute possibilité d'optimisation de la mesure (analyse croisée des données historiques de fonctionnement des éoliennes et des conditions climatiques) ;
 - Privilégier plusieurs méthodes parallèles pour analyser les risques et dimensionner un pattern de régulation (ex. mode de régulation prédictif standardisé de type Renebat pour sécuriser l'approche quantitative et le mode prédictif basé sur l'approche comportementale fine pour affiner qualitativement la mesure) ;
 - Adapter le mode de régulation au type de données sources disponibles et tenir compte des limites et avantages de chacun au cas par cas ;
 - Tenir compte des repères et des retours d'expériences positifs pour aider à un choix pondéré des paramètres et des seuils du pattern à retenir ;
 - Anticiper la mise en œuvre d'une mesure préventive ou corrective de régulation sans attendre la fin de campagne de suivi en cas de surmortalités durant les suivis ;
 - Tester différents scénarios de régulation pour argumenter la pertinence du choix retenu ;
 - Produire un document conclusif sur la mesure de régulation à mettre en œuvre ou à réviser et proposer une synthèse standardisée des résultats en fin de rapport ;
 - Faciliter l'accès aux rapports d'études d'impacts et de suivis environnementaux pour réaliser des analyses de synthèse et valoriser les retours d'expérience.

Remerciements. – Nous remercions les nombreuses personnes ayant contribué aux différentes phases de ce programme de recherche interannuel.

- Logistique et missions de terrain : Pierre Petitjean (EXEN), Émilien Bonichon (EXEN), Julien Caylet (EXEN), Alexis Roy (TotalEnergies)

- Saisie et analyses des données : Yannick Beucher (EXEN) ; Florence Matutini (CEFE CNRS), Xavier Nardou (EXEN), Frédéric Albespy (EXEN), Aurélien Besnard (CEFE CNRS), Eloïse André (EXEN), Sandra Dervaux (EXEN), Aurélie Langlois (EXEN), Léa Fabre (EXEN)
- Rédaction, relecture : Yannick Beucher (EXEN), Florence Matutini (CEFE CNRS), Xavier Nardou (EXEN), Aurélien Besnard (CEFE CNRS), Pierre Illac (TotalEnergies), Paul Franc (ADEME)
- Contributions enquêtes et fournitures de rapports
 - Bureaux d'étude : Ouest'Am, Ecosphère, Audicée, Calidris, Exen, KJM conseil
 - Institutions : DREALs, DEALs, OFB
 - Porteurs de projets, exploitants : SER, FEE, TotalEnergies,
- Membres du comité scientifique : Yves Bas (MNHN), Aurélien Besnard (CEFE CNRS), Yannick Beucher (EXEN), Camille Charpiat (SER), Paul Franc (ADEME), Pierre Illac (TotalEnergies), Nathalie Lamande (DREAL Occitanie), Maxime Leutchmann (SFPEM), Geoffroy Marx (LPO), Chloé Perradin (FEE), Sarah Pierre (DREAL Bourgogne Franche Comté), Charlotte Roemer (MNHN), Fabienne Rousset (DREAL Occitanie).

Un grand merci également aux services des DREAL et autres administrations qui ont répondu favorablement à nos requêtes de consultation de documents publics, ainsi qu'à l'ADEME qui a soutenu le projet financièrement.

Enfin, merci encore aux organisateurs des Rencontres nationales chauves-souris pour rendre possible cette tribune en faveur des Chiroptères.

BIBLIOGRAPHIE

- BATES D., MAECHLER M., BOLKER B., et *al.*, 2021. - Package 'lme4'
FRIEDENBERG, NICHOLAS A., et WINIFRED F. FRICK., 2021.
- Assessing Fatality Minimization for Hoary Bats amid Continued Wind Energy Development. *Biological Conservation* 262 (octobre) : 109309. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109309>
- LIN X., ZHANG D., 1999. - Inference in generalized additive mixed models by using smoothing splines. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology* 61 : 381-400. <https://doi.org/10.1111/1467-9868.00183>