



HAL
open science

Processus de Régulation des Eoliennes en faveur des Chiroptères

Yannick Beucher, Florence Matutini, Xavier Nardou, Aurélien Besnard,
Frédéric Albespy, Aurélie Langlois, Pierre Illac

► **To cite this version:**

Yannick Beucher, Florence Matutini, Xavier Nardou, Aurélien Besnard, Frédéric Albespy, et al..
Processus de Régulation des Eoliennes en faveur des Chiroptères: Analyse des pratiques à l'échelle
nationale, tests expérimentaux et recommandations. ADEME; EXEN; CEFE-CNRS; OFB; TOTAL
ENERGIE. 2023. hal-04380184

HAL Id: hal-04380184

<https://ofb.hal.science/hal-04380184>

Submitted on 8 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

PROGRAMME OPRECH

Processus de Régulation des Eoliennes en faveur des Chiroptères

Analyse des pratiques à l'échelle
nationale, tests expérimentaux et
recommandations

RAPPORT FINAL

Nov.
2022



EXPERTISES



EXEN
EXPERTISES EN ENVIRONNEMENT



REMERCIEMENTS

Logistique et missions de terrain

- Pierre PETITJEAN (EXEN),
- Emilien 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 ANDRE (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 LEUCHTMANN (SFEPM)
- Geoffroy MARX (LPO)
- Chloé PERRADIN (FEE)
- Sarah PIERRE (DREAL Bourgogne Franche Comté)
- Charlotte ROEMER (MNHN)
- Fabienne ROUSSET (DREAL Occitanie)

CITATION DE CE RAPPORT

BEUCHER Yannick, MATUTINI Florence, NARDOU Xavier, BESNARD Aurélien, ALBESPY Frédéric, LANGLOIS Aurélie, ILLAC Pierre. 2022. **Programme OPRECh, Optimisation des Processus de Régulation des Eoliennes en faveur des Chiroptères : Analyse des pratiques nationales, tests expérimentaux et recommandations.** 243 pages.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'oeuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1905C0033

Projet de recherche coordonné par : BEUCHER Yannick

Appel à projet de recherche : Energies durables 2018

Coordination technique - ADEME : PAUL Franc

Direction/Service : Service Réseau Energies Renouvelables

SOMMAIRE

1. PREAMBULE	9
1.1. Problématique générale	9
1.2. Objet du document	12
1.3. Etat des connaissances sur les rapports entre le développement éolien et la conservation des chiroptères (revue de la littérature spécialisée).....	14
1.3.1. Les chiroptères : des espèces difficiles à étudier et dont l'aéro-écologie (à hauteur de rotor des éoliennes) reste très mal connue.....	14
1.3.2. Des préoccupations croissantes sur l'effet cumulatif du développement éolien sur les populations de chiroptères	14
1.3.3. Des synthèses et outils de cadrage internationaux limités pour appréhender l'effet du développement éolien sur les populations de chauves-souris	15
1.3.4. Peu de retours d'expériences sur la mesure de régulation des éoliennes en faveur des chauves-souris	16
1.3.5. Cadre réglementaire Français et évolution historique des prescriptions techniques qui concernent la mesure de de régulation	17
1.3.5.1. Cadre règlementaire.....	17
1.3.5.2. Prescriptions techniques.....	18
1.4. Régulation des éoliennes en faveur des chauves-souris : vocabulaire et définitions....	20
1.4.1. Confusions et clarifications du vocabulaire utilisé.....	20
1.4.2. Les différents modes de régulation	21
1.4.2.1. Mode de régulation « sous seuil de production »	21
1.4.2.2. Mode de régulation « préventif » ou « conventionnel ».....	22
1.4.2.3. Mode de régulation « prédictif » ou « multicritères ».....	22
1.4.2.4. Mode de régulation « dynamique », en temps réel	24
1.4.3. Les différentes étapes du processus de régulation par le jeu d'acteurs	27
2. VOLET 1 : IDENTIFIER LES PRATIQUES DE LA REGULATION DES EOLIENNES EN FAVEUR DES CHAUVES-SOURIS EN FRANCE	28
2.1. Matériel et méthodes (volet 1).....	28
2.1.1. Trois objectifs principaux / trois principales bases de données	28
2.1.2. Constitution de la base de données « Taux de régulation national ».....	29
2.1.2.1. Sources des données.....	29
2.1.2.2. Organisation de la base de données « BDD Taux de régulation national »	31
2.1.3. Constitution de la base de données « BDD Pratiques de la régulation / projets éoliens »	33
2.1.4. Constitution de la base de données « BDD Pratiques de la régulation / parcs exploités »	34
2.1.4.1. Echantillon de données.....	34
2.1.4.2. Organisation de la base de données « BDD Pratiques de la régulation / parc exploités »	36
2.1.5. Autres sources de données : interviews.....	39
2.2. Résultats (volet 1).....	40
2.2.1. Quel est le stade de développement de la mesure en France ? (recensement)	40
2.2.1.1. Quelle proportion du parc éolien Français est régulée en faveur des chauves-souris ?	40

2.2.1.1.1. Echelle nationale.....	40
2.2.1.1.2. Disparités régionales.....	42
2.2.1.2. Comment la mesure s'est-elle développée dans le temps ?	44
2.2.1.3. Quelles sont les perspectives nationales ?	45
2.2.2. Quelles sont les pratiques du processus de régulation des éoliennes en faveur des chauves-souris ?.....	48
2.2.2.1. Comment sont exploitées les principales sources de données nécessaires au processus de régulation : étude de l'activité chiroptérologique et suivi des mortalités	48
2.2.2.1.1. Sources de données utilisées dans le cadre des études d'impacts de nouveaux projets	48
2.2.2.1.2. Sources de données dans le cadre des suivis d'impacts des parcs en activité ...	50
2.2.2.2. Comment est mise en œuvre l'étude de l'activité des chauves-souris en hauteur vers le processus de régulation ?	53
2.2.2.2.1. Etude de l'activité en hauteur dans le cadre de l'étude d'impact de nouveaux projets	53
2.2.2.2.2. Etude de l'activité en hauteur dans le cadre des suivis d'impact de parcs exploités	55
2.2.2.3. Comment sont traités, analysés et présentés les résultats de l'étude d'activité en hauteur dans le processus de régulation ?	62
2.2.2.3.1. Rappel des prescriptions nationales	62
2.2.2.3.2. Pratiques concernant les analyses et la présentation des résultats d'activité en hauteur	62
2.2.2.4. Comment est utilisé le suivi de la mortalité dans le processus de régulation ?.....	69
2.2.2.4.1. Rappel des prescriptions nationales	69
2.2.2.4.2. Pratiques de mise en œuvre du suivi de la mortalité au niveau des parcs régulés	70
2.2.2.4.3. Pratiques d'analyse et d'interprétation des résultats des suivis de la mortalité.	74
2.2.2.5. Comment les résultats de suivis de la mortalité et de l'activité des chauves-souris en hauteur sont-ils croisés ?	76
2.2.2.6. Comment la décision d'une mesure de régulation est-elle prise et pour quel mode de régulation ?	77
2.2.2.6.1. Rappel des prescriptions nationales	77
2.2.2.6.2. Pratiques concernant la prise de décision d'engager la mesure.....	77
2.2.2.6.3. Pratiques concernant les modes de régulation retenus	79
2.2.2.7. Quelles sont les pratiques du dimensionnement de la régulation (quel pattern est retenu) ?	83
2.2.2.7.1. Dimensionnement dans le cadre des études d'impacts de projets éoliens	83
2.2.2.7.2. Dimensionnement dans le cadre de suivis d'impacts de parcs en activité.....	85
2.2.3.1. Comment la mesure de régulation est-elle contrôlée et évaluée ?	95
2.2.3.1.1. Pratiques concernant le choix des critères de comparaison interannuelle du niveau de mortalité (approche quantitative).....	96
2.2.3.1.2. Pratiques concernant le choix des critères d'analyse de l'évolution interannuelle de l'activité des chauves-souris	98
2.2.3.1.3. Pratiques concernant l'analyse de la bonne mise en œuvre effective de la mesure au cours de la campagne testée.....	99
2.2.3.1.4. Estimation moyenne l'évolution des niveaux d'impacts avant / après mesure de régulation	103
2.2.3.1.5. Comment sont argumentées les conclusions des études sur l'efficacité de la mesure passée pour la reconduction ou l'optimisation de la future mesure ?.....	108
3. VOLET 2 : TESTER LES PRINCIPAUX MODELES DE REGULATION (VOLET EXPERIMENTAL).....	115

3.1. Matériel et méthodes (volet 2)	115
3.1.1. Principes généraux	115
3.1.2. Choix du site	115
3.1.3. Modèles de régulation testés.....	119
3.1.4. Relevés chiroptérologiques.....	119
3.1.4.1. Relevés des mortalités.....	120
3.1.4.2. Relevés acoustiques.....	120
3.1.4.3. Définition de l'activité chiroptérologique.....	121
3.1.5. Données météorologiques et de fonctionnement des éoliennes	121
3.1.6. Analyses statistiques.....	122
3.1.6.1. Partie 1. Effet des différents modes de régulation sur la mortalité observée	122
3.1.6.2. Partie 2. Effet de l'activité sur la mortalité	123
3.1.6.3. Partie 3. Effet des variables météorologiques et de fonctionnement de l'éolienne sur la mortalité.....	123
3.1.6.4. Partie 4. Effet des variables climatiques sur l'activité	124
3.2. Résultats (volet 2)	124
3.2.1. Partie 1. Effet des différents modes de régulation sur la mortalité observée	125
3.2.2. Partie 2. Effet de l'activité chiroptérologique sur la mortalité.....	127
3.2.3. Partie 3. Effet de des variables météorologiques, temporelles et de fonctionnement de l'éolienne sur la mortalité.....	129
3.2.4. Partie 4. Effet des variables climatiques sur l'activité	131
3.2.4.1. Résolution temporelle de 24h	131
3.2.4.2. Résolution temporelle de 1h	136
3.3. Discussion (volet 2)	139
3.3.1. Mortalités observées.....	139
3.3.2. Effets des modalités de régulation sur la mortalité.....	139
3.3.3. Peut-on prédire l'activité des chiroptères à partir de variables climatiques et temporelles ?	141
3.3.3.1. Le vent	141
3.3.3.2. La température	142
3.3.3.3. La pluviométrie	142
3.3.3.4. Jour de l'année	143
3.3.3.5. Heure de la nuit	143
3.3.3.6. La vitesse du rotor	144
3.3.4. Un lien partiel mais significatif entre mortalité et activités.....	144
3.3.5. Prédire la mortalité en modélisant l'activité : vers l'utilisation d'algorithmes plus complexes ?	146
3.3.6. Limites scientifiques et méthodologiques de cette étude	146
3.3.6.1. Données de mortalité	146
3.3.6.2. Données acoustiques et détectabilité	147
3.3.6.3. Des irrégularités dans la régulation des machines.....	147
3.3.7. Perspectives.....	147
3.3.8. Synthèse et conclusion (volet 2)	148
3.4. Simulations de différents pratiques de régulation sur le jeu de données expérimental d'OPRECh	149
3.4.1. Simulation du mode de régulation préventif sous seuil de production	149
3.4.2. Simulation du mode de régulation préventif conventionnel.....	149
3.4.3. Simulation du mode de régulation prédictif basé sur l'outil ProBat (études RENEBAT, source KJM Conseil Environnement).....	153
3.4.3.1. Historique de développement de l'outil ProBat en Allemagne	153
3.4.3.2. Conditions de mise en œuvre de l'outil ProBat	153

3.4.3.3. Test de la méthode RENEBAT avec les données expérimentales d'OPRECh	154
3.4.4. Simulation du mode de régulation prédictif basé sur une approche comportementale (Exen) 158	
3.4.4.1. Choix des éoliennes utilisées pour les analyses.....	158
3.4.4.2. Régulation préconisée sur la base du suivi 2019	159
3.4.4.2.1. Présélection des seuils de paramètres via analyse séparée de leur influence sur l'activité (paramètres testés un par un).....	159
3.4.4.2.2. Vérification de l'effet global attendu du pattern retenu sur la chronologie d'activité de référence (paramètres combinés)	161
3.4.4.2.3. Comparaison de la mesure retenue avec les tests expérimentaux du volet 2 d'OPRECh 163	
3.4.5.1. Effet de la pression de suivi sur la mortalité brute retrouvée	165
4. VOLET 3 : SYNTHÈSE DES CONTRAINTES ET DES LEVIERS ET RECOMMANDATIONS VERS UNE MESURE DE REGULATION OPTIMISEE	171
4.1. Recommandations générales vers une systématisation de la mesure de régulation en France, contraintes et leviers	171
4.2. Trois grands principes à respecter vers une optimisation efficace des processus de régulation en France.....	174
4.2.1. Principe de transparence et d'argumentation scientifique.....	174
4.2.2. Principe d'humilité pour la qualité des études et la progression des connaissances....	174
4.2.3. Principe de proportionnalité et de compromis entre l'intérêt des chiroptères et de la production d'énergie	175
4.3. Contraintes, leviers et recommandations concernant pour les différentes phases du processus	176
4.3.1. Acquisition et traitement des données d'activité en hauteur en continu	176
4.3.2. Acquisition et traitement des données du suivi de la mortalité	179
4.3.3. Analyse croisée de l'ensemble des données disponibles.....	181
4.3.4. Phase de prise de décision, de dimensionnement et de contrôle de la mesure de régulation	182
4.3.4.1. Caractère « significatif » ou « non significatif » de l'impact résiduel.....	182
4.3.4.2. Evaluation de l'efficacité ou de l'échec de la mesure.....	183
4.3.4.3. Prise en compte des problèmes de mise en œuvre effective de la mesure	184
4.3.4.4. Modes de régulation à favoriser selon les situations.....	185
4.3.4.5. Quelques repères sur pour aider au choix des paramètres et des seuils du pattern à retenir 187	
4.3.4.6. Anticipation de mise en œuvre de la mesure	188
4.3.4.7. Tester différents scénarios de régulation pour argumenter la pertinence du choix retenu 188	
4.3.4.8. Produire un document conclusif et une synthèse standardisée des résultats.....	190
4.4. Autres contraintes et leviers (partage et valorisation des connaissances)	191
BIBLIOGRAPHIE	192
ANNEXES.....	197
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	236
SIGLES ET ACRONYMES	241

RÉSUMÉ

Pour faire face aux changements climatiques et à ses impacts sur l'environnement et les sociétés humaines, une transition mondiale vers les énergies décarbonées et renouvelables est nécessaire. Cependant, les impacts du développement éolien sur la faune, et notamment sur les chiroptères, sont bien documentés. La mise en place de mesures de réduction de ces impacts est donc essentielle dans un contexte de crise de la biodiversité. Le programme OPRECh est spécifiquement ciblé sur les processus de dimensionnement, de mise en œuvre et de contrôle de la mesure de régulation des éoliennes pour réduire les mortalités qu'elles génèrent 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 vaste revue de la littérature spécialisée destinée à faire un premier bilan du stade de développement actuel 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 Français bénéficie de cette mesure, mais que cette dernière est globalement efficace quand elle est mise en œuvre. C'est d'autant plus encourageant que cette efficacité souffre des problèmes de mise en œuvre effective. Les pratiques sont diversifiées, avec des disparités régionales mais tendent à s'améliorer 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 variables. Au sein du parc étudié, comparées aux éoliennes non régulées, les éoliennes régulées lors des vitesses de vent de 6 m/s ont permis de réduire 100% des mortalités. L'effet a été moindre mais notable pour des seuils de 3 et 4.5 m/s de vent (respectivement 56 à 61% de réduction de mortalité). Les analyses complémentaires montrent que le risque de mortalité augmente significativement avec la température, lorsque la vitesse du rotor diminue et lorsque l'activité au sol et en nacelle est élevée. La température, la vitesse du vent et la période de l'année sont des variables pertinentes pour prédire une partie de l'activité à l'échelle de la nuit. Néanmoins, les réponses entre les espèces sont variées, et les difficultés de prédiction de l'activité et des risques de mortalité concernent surtout les espèces du groupe des nyctaloïdes. La mise en place d'une régulation reste essentielle pour réduire les impacts des éoliennes sur les populations de chiroptères. Leur calibrage à partir de seuils fixes de vent et de température seulement est une mesure efficace pour réduire significativement les mortalités de *Pipistrellus sp.* mais reste insuffisante dans un objectif d'optimisation.

Le troisième volet (3) synthétise les résultats sous les formes d'une liste de contraintes, leviers et recommandations pour l'ensemble du processus de régulation. Il invite les acteurs vers des pratiques et des principes en faveur d'une systématisation rapide et à large échelle de la mesure, et vers différents leviers d'optimisation.

1. Préambule

1.1. Problématique générale

Pour faire face aux changements climatiques et à leurs impacts sur l'environnement et sur les sociétés humaines, une transition mondiale vers les énergies décarbonées et renouvelables est à la fois nécessaire et urgente. Le deuxième volet du 6ème rapport du GIEC (février 2022) affirme que les conséquences dévastatrices du changement climatique, longtemps vues comme un point à l'horizon, sont devenues une réalité maintenant aux quatre coins de la planète, avec 3,3 à 3,6 milliards de personnes d'ores et déjà « très vulnérables », soit près de la moitié de l'humanité. Concrètement, les effets concernent ;

- La **réduction de la disponibilité des ressources en eau et en nourriture** (en Afrique, en Asie et dans les petites îles notamment) ;
- **L'impact sur la santé dans toutes les régions du monde** (plus grande mortalité, émergence de nouvelles maladies, épidémies, développement du choléra), augmentation du stress thermique, dégradation de la qualité de l'air... ;
- La **baisse de moitié des aires de répartition des espèces animales et végétales**.

Les experts évoquent les incidences à venir pour un milliard d'habitants des régions côtières menacés en 2050. Les effets en cascade liés aux catastrophes naturelles de plus en plus rapprochées induit des conséquences sur la production alimentaire, la hausse du prix des aliments ou encore la malnutrition.

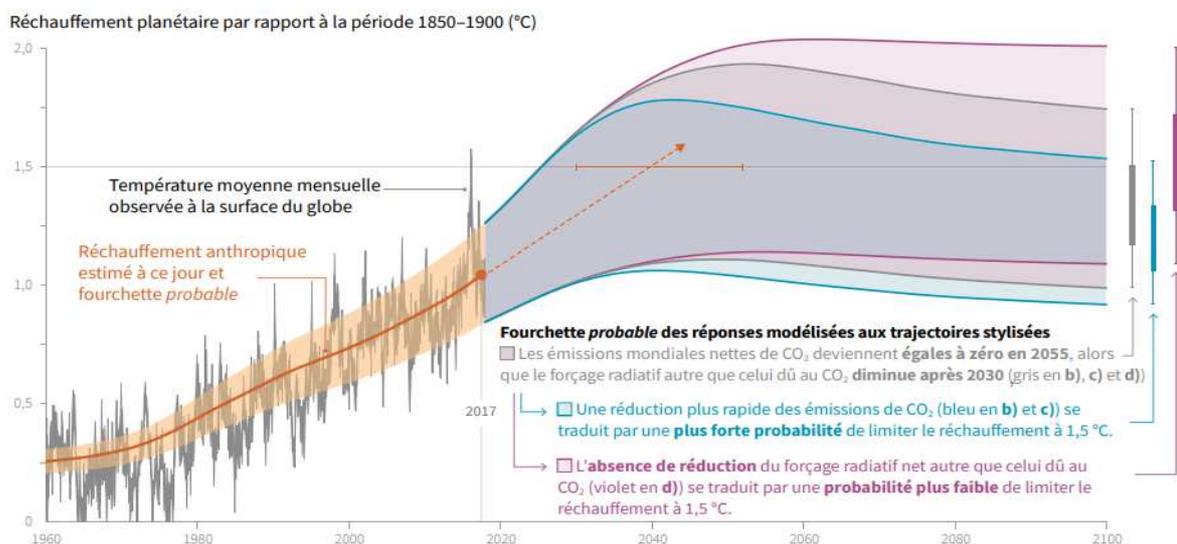


Figure 1 : Variation de la température mondiale observée et réponses modélisées à des trajectoires stylisées des émissions et du forçage anthropique (source : GIEC 2019)

Des solutions pour un développement résilient face à ce dérèglement climatique sont toutefois encore possibles en consacrant des efforts à la fois importants, urgents et planétaires dans des secteurs clefs ;

- la **transition énergétique** pour réduire les émissions de CO₂ apparaît comme le premier levier d'action, et notamment le développement des énergies renouvelables (dont l'éolien est la technologie la plus mature et la plus économique) au dépend des énergies fossiles.
- une meilleure **gestion de l'eau et de l'irrigation** mais aussi une meilleure adaptation des cultures aux conditions climatiques via l'agroécologie ;
- la **préservation du milieu naturel** (restauration des forêts et des écosystèmes naturels, arrêt de l'urbanisation dans les zones côtières, végétalisation des villes...)

Le rapport 2022 du GIEC reconnaît que des efforts ont été réalisés pour réduire les émissions de CO₂ ces dernières années, mais les auteurs du rapport dénoncent une inadéquation des moyens mis en œuvre face à la rapidité des changements, signe d'un "manque de volonté politique" avec, pour exemple, le non-respect des engagements de Glasgow 2021 lors de la COP 26 en matière de doublement des budgets pour lutter contre le réchauffement.

Pourtant, au lendemain des accords de la COP 21 à Paris (2015), 186 pays avaient publié leur plan d'action pour faire baisser leurs émissions de gaz à effet de serre. Avec la loi relative à la transition énergétique, la France s'était ainsi fixé deux principaux objectifs :

- 40% de réduction de ses émissions d'ici 2030, par rapport au niveau de 1990 ;
- 75 % de réduction de ses émissions d'ici 2050, par rapport au niveau de 1990 pour atteindre la neutralité carbone (la France émettrait alors sur son territoire autant de gaz à effet de serre qu'elle en absorbe).

La Loi de transition énergétique pour la croissance verte, promulguée le 18 août 2015, s'est fixée pour objectif d'atteindre 32 % d'énergies renouvelables dans la consommation totale d'énergie à l'horizon 2030 de manière à répondre plus efficacement à la lutte contre le changement climatique. Au 30 juin 2021, les parcs éoliens français ont atteint une puissance de 18,3 GW avec 2067 installations raccordées, soit 23 % de plus qu'au cours de la même période de l'année 2020 (SDES 2021). La production d'électricité éolienne s'est élevée à 19,9 TWh au cours du premier semestre 2021, soit 8,2 % de la consommation électrique française (SDES 2021). La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) prévoit un premier objectif de puissance installée pour fin 2023 de 24,1 GW et entre 33,2-34.7GW pour fin 2028 (cf. décret n°2020-456 du 21 avril 2020) soit une augmentation de 31% puis de 81% à 90% de puissance installée par rapport à 2021.

En pratique, la France est le seul pays européen à n'avoir pas atteint ses objectifs de développement d'énergies renouvelables fin 2020, alors que la grande majorité de ses voisins les ont largement dépassés (source Alternatives économiques / eurostats, 27/01/2022). Le 14 octobre 2021, le tribunal administratif de Paris a condamné l'état pour préjudice écologique dans la lutte contre le changement climatique et a donné raison aux défenseurs de l'environnement de "l'Affaire du siècle" quant au dépassement du plafond d'émissions de gaz à effet de serre entre 2015 et 2018. Les enjeux sont encore exacerbés ces derniers mois avec la crise géopolitique du conflit russo-ukrainien et la mise en lumière de la fragilité et de la dépendance des ressources énergétiques nationales et internationales.

Si tous ces éléments rappellent combien l'enjeu climatique est une urgence cruciale pour l'Homme, la biosphère et les générations futures, et dans lequel l'éolien est un moyen de lutte majeur, le développement ambitieux de la filière éolienne doit aussi se faire en accord avec les enjeux de protection de la biodiversité et la réglementation environnementale afférente notamment concernant les atteintes au bon état de conservation des espèces protégées. L'éolien génère en effet des impacts négatifs sur la biodiversité et notamment sur les oiseaux et chiroptères avec des mortalités constatées dans le monde entier (Rydell et al. 2010; Grodsky et al. 2011; Arnett et al. 2016; Frick et al. 2017; UNEP/EUROBATS 2019). Les chiroptères sont tout particulièrement exposés et probablement les plus sensibles aux risques éoliens avec des centaines de milliers de mortalités intervenant chaque année en Amérique du Nord comme en Europe (cf. revue de la littérature du chapitre 1.3.2 page 14). Les préoccupations s'intensifient ces dernières années sur l'effet cumulé de ces mortalités et donc des perspectives de développement éolien sur l'équilibre des populations.

La France métropolitaine compte 36 espèces de chiroptères, toutes protégées à l'échelle nationale par la loi du 10 juillet 1976 relative à la protection de la nature, article L.411-1 du Code de l'Environnement et par arrêté ministériel du 23 avril 2007 (JORF du 10/05/2007). Elles sont également protégées au niveau international (conventions de Bonn du 23 juin 1979 et de Berne du 19 septembre 1979) et européen par la directive européenne « Habitats-Faune-Flore » (CEE N°92/43) apportant une protection réglementaire des espèces et de leurs habitats. La dernière publication de la liste rouge nationale des espèces menacées (UICN France 2017) constate une dégradation générale de l'état de conservation des espèces de chiroptères avec, en 2017, huit espèces menacées (« en danger critique », « en danger » ou « vulnérable ») et huit autres « quasi-menacées » contre quatre et sept respectivement lors de la précédente évaluation (2009). I

Réduire la mortalité engendrée par le développement éolien sur la biodiversité est un axe de la politique nationale de transition énergétique encadré par des exigences réglementaires relatives à la protection des espèces de chiroptères et de leurs habitats. C'est possible par la mise en place de mesures de régulation du fonctionnement des éoliennes lorsque les conditions climatologiques sont les plus favorables à l'activité des chiroptères, correspondant par ailleurs en général à des conditions de faible production énergétique (Erickson and West 2002; Reynolds 2006; Arnett et al. 2008). Cette régulation consiste à arrêter l'éolienne ou plus communément de la « mettre en drapeau », c'est-à-dire à changer l'orientation des pales en les plaçant parallèlement au vent, réduisant drastiquement la vitesse de rotation. Ces mesures ont montré leur efficacité à l'échelle internationale (ex. Arnett et al. 2011; Arnett and Baerwald 2013; Adams et al. 2021; Whitby et al. 2021). Cependant, elles se développent de façon empirique, restent peu documentées en Europe et sans réel cadre de suivi à l'échelle nationale. La maîtrise des risques de mortalité des chiroptères par mesure de régulation reste pourtant la priorité pour concilier le développement éolien et la préservation des populations de chauves-souris (SFEPM, Beucher 2020).

Par ailleurs, si les conditions de vol des chauves-souris sont associées à des conditions de faible production énergétique (vents faibles), la mise en place de ces mesures de régulation devrait engendrer une perte de production limitée. C'est une perception souvent confirmée par les premiers retours d'expériences internationales (moyenne de 0,8% d'après Whitby 2021 pour 11 parcs étudiés aux USA). Mais le faible échantillon de retours sur ces pertes de production ne permet pas de juger s'ils sont représentatifs de modèles généraux (Whitby 2021). D'autant que les niveaux de pertes de production sont aussi très variables (de moins de 1% à plus de 10% d'après Maclaurin et al. 2022, jusqu'à 8% pour des parcs ultra-marins d'après TotalEnergies) selon les sites, les prescriptions locales, les patterns de mesures engagées, le nombre de critères climatiques pris en compte dans ces patterns. Or même de faibles pertes de production peuvent parfois remettre en question l'équilibre financier de certains parcs. Il a été estimé aux USA (Maclaurin et al. 2022) qu'une mesure de régulation moyenne (arrêt de production sous 6 m/s de vent du 1^{er} juillet au 31 octobre) réduirait 9,5% du rendement du parc éolien national, et que des seuils plus élevés pourraient impacter la viabilité financière de la filière.

Finalement, il semble qu'il y ait des marges de manœuvre importantes pour optimiser ces mesures de réduction d'impacts tant en faveur des chauves-souris que pour la production d'énergie éolienne. La recherche du meilleur compromis entre ces deux enjeux est reconnue comme une priorité dans le contexte actuel (Arnett 2013, Whitby 2021). Ce peut être notamment par de meilleures connaissances scientifiques concernant l'écologie des espèces locales, leurs interactions avec les parcs éoliens, par une meilleure compréhension des facteurs influençant la mortalité pour les différentes espèces considérées, par un partage des expériences, par la recherche de solutions pour réduire les pertes de production d'énergie qu'elles engendrent, par un suivi de leur développement en France et une analyse des pratiques, etc.

1.2. Objet du document

1.2.1. Contexte et finalité de l'opération

Le programme **OPRECh** (Optimisation des Processus de Régulation des Eoliennes en faveur des Chiroptères) est né en réponse à un appel à projets national « Energies durables 2018 » porté par l'ADEME. Il a été codéveloppé depuis 2019 par trois partenaires complémentaires ;

- Le bureau d'étude EXEN spécialiste des liens entre éolien et faune volante,
- Le Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive (CEFE), un des plus importants laboratoires de recherche en Ecologie de France,
- Et TotalEnergies, un des leaders mondiaux de l'exploitation de parcs éoliens.

Il a été présenté à un comité scientifique dans lequel siège une bonne partie des organismes concernés par les liens entre éolien et chiroptères à l'échelle nationale (représentants de l'Etat, d'associations de protection de la nature, de syndicats éoliens, d'organismes de recherche).

Le contexte général présenté plus haut est celui dans lequel a été envisagé ce projet à l'origine, même si depuis trois ans, les enjeux se sont renforcés.

OPRECh est donc 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 au profit des chiroptères 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 approfondies 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 difficile** entre les acteurs de la filière éolienne, ont engendré une mauvaise appréhension de ces modes de régulations, 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 **combler (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**. Le présent document en est une synthèse.

1.2.2. Public concerné

Ce document s'adresse aux exploitants et porteurs de projets éoliens, mais aussi à tous les acteurs techniques et administratifs intervenant directement ou indirectement dans le dimensionnement et la mise en œuvre des mesures de régulation des éoliennes en faveur des chiroptères (bureaux d'étude, associations naturalistes, DREALs, DEALs, inspecteurs ICPE, turbiniéristes, constructeurs de matériels de mesures, organismes de recherche...). Il est envisagé comme un outil de démocratisation de la mesure de régulation pour faciliter son appropriation par tout un chacun, et sa mise en œuvre à large échelle, par une approche méthodique, efficace, et optimisée en fonction du contexte. Il se veut transparent et orienté vers la recherche d'un compromis équilibré entre la conservation des populations de chauves-souris et la production d'énergie renouvelable.

1.2.3. Principes généraux du projet OPRECh en trois volets

OPRECh se décompose en 3 objectifs distincts à l'origine de 3 volets d'étude complémentaires :

- **Volet 1 / Identifier l'ensemble 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 (exploitants, turbiniers, bureaux d'étude, administration...) et valoriser les expériences positives. Il s'agira 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,
 - 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 lisières ou de haut-vols, migrations, pics d'activité autour des rotor...), mais aussi selon les milieux, les conditions climatiques, etc...
- **Volet 3 /** Sur la base des résultats des étapes précédentes, **proposer une synthèse des 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...).

1.3. Etat des connaissances sur les rapports entre le développement éolien et la conservation des chiroptères (revue de la littérature spécialisée)

1.3.1. Les chiroptères : des espèces difficiles à étudier et dont l'aéro-écologie (à hauteur de rotor des éoliennes) reste très mal connue

De par leur activité de vol nocturne, les chauves-souris sont l'un des taxons de la faune sauvage les plus difficiles à étudier. Le développement progressif des méthodes de bioacoustique depuis quelques dizaines d'années permet de s'affranchir partiellement de ces difficultés de suivis (Barataud M. 2015). De façon générale, même depuis le sol, de nombreuses limites demeurent toutefois pour caractériser de façon représentative l'activité des chauves-souris (portée d'écholocation des espèces, conditions climatiques et atmosphériques, type de matériel acoustique et paramétrage, sensibilité, expérience de l'analyste, orientation de vol des espèces, artefacts acoustiques...).

Dans le cadre d'un projet éolien, l'attention porte principalement sur l'activité de vol des chauves-souris en plein ciel, c'est-à-dire à hauteur de rotation des pales d'éoliennes. Les limites de la bioacoustique évoquées précédemment sont alors exacerbées (portée d'écholocation mal perceptible depuis le sol, signature acoustique différente en plein ciel que proche du sol...), sans compter de nombreuses autres contraintes techniques, logistiques et acoustiques à prendre en compte pour un suivi depuis une nacelle d'éolienne, et des phénomènes particuliers encore mal connus (effet de l'aérologie sur l'essaimage d'insectes-proies en altitude, comportement sociaux, attractivité voire aversion des éoliennes...)(Rydell et al. 2010 ; Barré 2018, Voigt 2021, Richardson et al. 2021). Cela impose une diversité d'outils et de méthodes complémentaires, qui contribuent à donner à la chiroptérologie liée à l'éolien un caractère très technique. Elle requiert un fort investissement de formation et de pratique, avant que les chiroptérologues ne soient spécialisés dans ce domaine et puissent prendre du recul sur l'aéro-écologie des chauves-souris.

Si à priori les limites d'analyse en plein ciel supposent l'hypothèse implicite d'une distribution uniforme de l'activité des chauves-souris dans l'entourage du rotor (Voigt et al. 2021), avec l'expérience d'analyse de nombreuses situations de suivis acoustiques en hauteur, différents types de comportements commencent à être distingués, même si l'interprétation de leur fonctionnalité propre reste ouverte. Langlois & al. (2017), Beucher et al. (2017) décrivent notamment une typologie des vols (effets « lisières », prises d'altitudes ponctuelles et massives de pipistrelles, activité de plein ciel) par groupes d'espèces et en fonction leurs comportements de vols et du contexte environnant du parc éolien. Les différences de comportements peuvent s'apprécier à l'échelle de l'espèce et groupes d'espèces, mais varient aussi selon les saisons. Ainsi, les noctules volent jusqu'à plusieurs centaines de mètres au-dessus du sol, en moyenne dans la zone à risque du rotor en dehors de la période de migration (Roeleke et coll. 2016, O'Mara et al. 2019a), mais beaucoup plus haut pendant la migration printanière (O'Mara et coll. 2019b).

1.3.2. Des préoccupations croissantes sur l'effet cumulatif du développement éolien sur les populations de chiroptères

Les chiroptères constituent l'un des taxons les plus sensibles aux infrastructures éoliennes (Arnett et al. 2008, 2016; Cryan and Barclay 2009; Schuster et al. 2015; O'Shea et al. 2016; Frick et al. 2017). En Amérique du Nord et en Europe, des études ont ainsi estimé que des dizaines voire des centaines de milliers de chauves-souris meurent chaque année suite à des collisions avec les pales ou par barotraumatisme (Grodsky et al. 2011; Arnett and Baerwald 2013; Voigt et al. 2015; Arnett et al. 2016; Frick et al. 2017). Or, les chauves-souris possèdent un très faible taux de fécondité et une longue durée de vie (stratégie d'histoire de vie dite « lente » ou « espèce longévive ») ce qui confère à leurs populations une forte sensibilité à une augmentation du taux de mortalité (Barclay and Harder 2003).

Une étude sur la dynamique des populations de *Lasius cinereus*, une espèce nord-américaine relativement commune, a montré par exemple que le développement éolien augmentait significativement le risque d'extinction de cette espèce (Frick et al. 2017). Cependant, certaines espèces sont plus sensibles que d'autres au développement éolien. Par exemple, les espèces de haut vol ont une sensibilité accrue par comparaison aux espèces glaneuses qui volent plus près du sol et capturent leurs proies directement sur la végétation ou au sol (Arnett et al. 2016; Roemer et al. 2017). Ces espèces de haut vol sont généralement des espèces migratrices pouvant parcourir plusieurs centaines de kilomètres, renforçant ainsi leur vulnérabilité par cumul d'impact (Arnett et al. 2016; Frick et al. 2017). En France, la situation d'espèces migratrices telles que la Noctule commune (*Nyctalus noctula*), la Grande Noctule (*Nyctalus lasiopterus*), la Noctule de Leisler

(*Nyctalus leisleri*) et la Pipistrelle de Nathusius (*Pipistrellus nathusii*) s'avère particulièrement préoccupante à long terme (UICN France 2017; UNEP/EUROBATS 2019).

Outre les impacts engendrés par la construction du parc (ex. destruction direct d'habitat et perturbation des fonctionnalités écologiques ; Arnett and May 2016), les impacts post-implantation connus sur les populations peuvent être directs – par collision avec les pales ou par barotraumatisme induit par des changements de pression entre le mât et la zone de rotation des pales (Arnett et al. 2016) – ou indirects par une dégradation des habitats environnants ou résultant de phénomènes complexes d'attraction et/ou de répulsion à différentes échelles spatiales et variant suivant les contextes paysagers et les espèces considérés.

L'effet d'attractivité des chauves-souris par les éoliennes est identifié à l'échelle internationale depuis une quinzaine d'années. Il existe un consensus scientifique sur le fait que les mortalités observées sont amplifiées par des comportements à risques résultant de phénomènes d'attraction des éoliennes. Les raisons de cette attractivité restent encore mal connues et les hypothèses d'explication variées (Guest et al. 2022). Aux USA, il semblerait que certaines espèces, notamment arboricoles, viennent explorer l'éolienne à la recherche de gîte (Cryan 2008) ou utilisent l'éolienne comme support de parade tel un « grand arbre » (Cryan et al. 2014). Au-delà des comportements sociaux, d'autres hypothèses d'attractivité sont aussi avancées sur la base des effets de bruits, de lumières, d'eau de condensation, de chaleur liés aux éoliennes (Guest et al. 2022). Mais les éoliennes attirent aussi certains insectes (Long et al. 2010) consommés par les chauves-souris, ce qui les attirent en retour (Hypothèse de « feeding attraction » ; Rydell et al. 2010; Voigt 2021, Richardson et al. 2021, De Jong et al. 2021).

L'effet d'aversion a été envisagé plus récemment d'abord à l'échelle nationale (ex. Barré et al. 2018; Million et al. 2018.). En milieu agricole, Barré et al. (2018) ont ainsi mis en évidence un phénomène de répulsion avec une diminution de l'activité des espèces de lisière le long des haies jusqu'à 1 km des parcs étudiés. En Angleterre, Richardson et al. 2021 n'ont quant à eux, pas trouvé d'effet d'aversion sur les espèces de lisières en positionnant les détecteurs en milieux ouverts, mais ont, montré que leur activité était plus élevée dans les milieux ouverts (c.a.d à plus de 50m des lisières les plus proches) à proximité des éoliennes que dans les milieux ouverts plus distants.

En contexte forestier (Allemagne), Ellerbrock et al. 2022 ont montré une diminution de l'activité des espèces forestières glaneuses jusqu'à quelques centaines de mètres de l'éolienne, notamment pour les éoliennes à large rotor et en période estivale. Ces espèces sont actuellement peu concernées par les risques collision au vu de la hauteur actuelle en bout de pales, mais seraient tout de même indirectement impactées par des phénomènes de répulsion. Dans cette étude, aucun effet sur l'activité n'a cependant été observé sur les espèces de lisières (*P. pipistrellus* exclusivement) expliqué par, selon les auteurs, la création d'un réseau de lisières plus important à proximité des éoliennes du fait de leur implantation en contexte forestier (ouverture des milieux) venant ainsi contrebalancer le phénomène de répulsion, mais potentiellement accroître les risques de collision. Enfin, concernant les noctules, seuls des phénomènes d'attraction des éoliennes en fin d'été et à l'automne ont été observés en accord avec de nombreuses publications. En forêt boréale (Finlande), Gaultier et al 2022 confirment aussi une l'activité plus élevée de la Sérotine de Nilsson et de certains murins sp à distance des éoliennes (600 / 800m) étayant l'effet d'aversion possible pour ces espèces dans ce type de milieu.

1.3.3. Des synthèses et outils de cadrage internationaux limités pour appréhender l'effet du développement éolien sur les populations de chauves-souris

Compte tenu des différents impacts de l'éolien sur les chauves-souris, des guides nationaux ont été rédigés par de nombreux pays pour évaluer l'ampleur des effets et favoriser une meilleure prise en compte des chiroptères dans le développement éolien.

Une notice issue de la commission européenne (« Guidance document on wind energy developments and EU nature legislation, European commission, 2020) a pu recenser ces différents documents pour plusieurs pays du continent européen et plus largement. Ce document montre que certains pays respectent actuellement les recommandations Eurobats pour encadrer les effets des parcs éoliens sur les chiroptères (Israël, Belgique, République Tchèque, France, Lituanie). Certains pays ont établi leur propre réglementation officielle, qui peut se rapporter aux recommandations Eurobats mais avec des spécifications particulières (comme la Belgique, la France, la Lituanie), ou sans rapport avec Eurobats (Croatie, Finlande, Allemagne,

Portugal, Royaume-Uni, Serbie). D'autres pays présentent des guides nationaux non officiels, avec moins de garanties que ceux-ci soient appliqués pour chaque suivi (Bulgarie, Irlande, Pays-Bas, Roumanie, Espagne, Pologne). Finalement, ce travail de recensement des guides nationaux a été effectué pour 61 pays dans le cadre de cette notice de la commission européenne, et il s'avère que seuls 16 des 61 pays étudiés bénéficient de guides nationaux, officiels ou non, pour encadrer et évaluer les impacts de l'éolien sur les chauves-souris. Sans guides nationaux adoptés à l'échelle européenne, il semble alors difficile d'estimer avec précision les impacts des éoliennes sur les chiroptères à une échelle continentale. Ceci explique encore aujourd'hui des lacunes quant à la connaissance des impacts de l'éolien sur la faune volante, et plus généralement le manque de considération des enjeux chiroptérologiques dans les projets d'aménagement.

Au-delà du continent européen, l'existence de guides nationaux concernant la prise en compte des impacts de l'éolien sur les chiroptères est variable. Aux Etats-Unis, des documents référençant les bonnes pratiques à adopter pour prendre en compte les enjeux chiroptérologiques à l'échelle du pays entier ont été rédigés ("Methods and Metrics for Assessing Impacts of Wind Energy Facilities on Wildlife », Anderson et al., 1999) puis complétés avec l'amélioration des connaissances et des méthodes (Kunz et al., 2007, US Fish and Wildlife Service, 2012). Mais ces documents datent et ne tiennent pas compte des connaissances acquises cette dernière décennie. Il semble désormais que certains états des Etats-Unis aient développés des guides territoriaux pour quantifier l'impact de l'éolien sur les chauves-souris (Vermont Agency of Natural Resources, 2016). Cette territorialisation des pratiques peut de fait, compliquer la standardisation des protocoles et l'analyse des données collectées à l'échelle du pays entier.

En ce qui concerne l'Amérique latine, très peu de données sont disponibles à l'heure actuelle, que ce soit en termes de guides méthodologiques, de rapports de suivis ou de littérature scientifique. Un article scientifique de Agudelo et al. (2021) témoigne par ailleurs du manque de standardisation et de communication vis-à-vis des suivis de la faune volante sur le continent sud-américain, avec seulement 10 références de suivis post-implantation ayant pu être récoltées dans le cadre de cette méta-analyse pour toute l'Amérique latine.

En Australie, un guide national des bonnes pratiques a été rédigé pour prendre en compte les impacts de l'éolien sur la faune volante (Clean Energy Council, 2018).

En ce qui concerne l'Asie, très peu de documents sont publiés à l'heure actuelle favorisant la prise en compte des risques d'impacts de la faune volante au niveau des parcs éoliens. En Inde, le guide pour le développement des projets éoliens terrestres (Government of India, 2016) invite à tenir compte des enjeux liés aux oiseaux migrateurs au niveau des projets éoliens, sans pour autant mentionner évoquer les enjeux chiroptérologiques. Pour la Chine, aucun document officiel ou guide de bonnes pratiques pour la prise en compte des impacts de l'éolien sur la faune volante n'a pu être identifié, malgré le fait que ce pays soit au premier rang mondial de la production d'électricité éolienne.

L'intérêt de ces protocoles nationaux n'est pourtant plus à prouver, et c'est leur application à grande échelle qui permettrait d'appréhender non seulement les impacts sur les populations d'espèces protégées mais aussi l'efficacité de différentes mesures de réduction comme la mesure de régulation des éoliennes en faveur des chiroptères.

1.3.4. Peu de retours d'expériences sur la mesure de régulation des éoliennes en faveur des chauves-souris

La régulation des éoliennes en faveur des chiroptères est une mesure répandue dans de nombreux pays pour limiter les impacts de l'éolien sur les populations de chauves-souris, et les effets de cette mesure sont de plus en plus reconnus dans la littérature scientifique internationale (Arnett et al. 2013, Arnett et al. 2016, Whitby et al. 2021, Friedenbergs & Frick, 2021).

Concernant les fondements de cette mesure, la corrélation générale entre l'activité chiroptérologique mesurée en hauteur et la mortalité retrouvée au sol a pu être démontrée en France (Roemer & al. 2017). Aux Etats-Unis, l'article de Smallwood et al. (2020b) montre également un fort lien de causalité entre le nombre de passages de chauves-souris au niveau du rotor et le nombre de mortalités, avec une activité quatre fois plus forte en moyenne au niveau du rotor pour les nuits qui précèdent la découverte de mortalités. Ainsi, réguler le fonctionnement des éoliennes lors des périodes de plus forte activité des chiroptères paraît cohérent pour réduire les risques de mortalité, en particulier au vu des différents comportements encore mal compris que peuvent avoir les chauves-souris vis-à-vis des éoliennes (Richardson et al., 2021).

Historiquement, une des premières publications vérifiant l'efficacité de la régulation avait mesuré une diminution de l'ordre 44 à 93% de la mortalité de chiroptères lorsqu'un plan de régulation était appliqué durant les périodes favorables à l'activité des chiroptères (Arnett et al., 2011).

Aux Etats-Unis, suite à la publication de l'article de Frick et al., (2017) témoignant des menaces du développement éolien sur la viabilité des populations de chauves-souris migratrices (en particulier de *Lasius cinereus*), une nouvelle étude a permis d'estimer le risque de déclin des populations de cette espèce avec ou sans mesures de régulation des éoliennes (Friedenberg & Frick, 2021). Les projections alors menées sur la dynamique des populations de *Lasius cinereus* montrent alors que si cette mesure était engagée à large échelle aux USA, elle permettrait de pallier au risque d'extinction de cette espèce. Des analyses récentes témoignent tout de même de la difficulté d'application de cette mesure à grande échelle, en particulier en ce qui concerne les parcs éoliens les plus anciens, qui sont souvent non régulés et causent le plus de mortalités (Voigt et al., 2022).

Plus globalement, une méta-analyse récente de l'efficacité des mesures de régulation des éoliennes dans toute l'Amérique du Nord témoigne de preuves solides sur l'efficacité de la mesure à large échelle, avec une diminution moyenne de 63% des mortalités de chauves-souris lorsqu'un plan de régulation des éoliennes est engagé (Adams et al., 2021).

Les preuves d'efficacité de la mesure de régulation des éoliennes ne sont pas uniquement cantonnées à l'Europe de l'Ouest et à l'Amérique du Nord. Cette mesure de réduction a aussi été mise en place avec succès pour réduire les mortalités sur des parcs éoliens en Australie (Bennett et al., 2022) avec une diminution des mortalités de 54% lorsque les éoliennes étaient régulées pour des vitesses de vent inférieures à 4,5 m/s. Cette efficacité de la mesure se retrouve également en Europe de l'Est (Măntoiu et al, 2020) où une régulation pour des vitesses de vent inférieures à 6,5 m/s a engendré 78% de mortalités en moins sur une période de 4 ans.

Finalement, dans une méta-analyse récente recensant de nombreuses publications scientifiques ayant évalué l'efficacité d'un plan de régulation, Whitby et al. (2021) ont mis en évidence une grande diversité d'efficacité des mesures de régulation en fonction des contextes géographiques. De plus, la majorité des patterns sont définis à partir de seuils de mise en rotation des pales seulement associés à des vitesses de vent alors que d'autres paramètres, tels que la température et les précipitations, influent également sur l'activité des chiroptères (Erickson and West 2002; Reynolds 2006; Arnett et al. 2011). Ainsi, des retours d'expérience sur l'efficacité des modalités de régulation « multicritères » sont nécessaires d'autant que les premiers résultats obtenus avec ces approches, notamment en Allemagne, sont encourageants (Korner-nievergelt et al. 2013 ; Behr et al. 2017 ; Martin et al. 2017 ; Hayes et al. 2019).

En France, les retours d'expériences des pratiques de la régulation sont nombreux grâce au cadre réglementaire qui impose les suivis d'impacts éoliens et donc une analyse de l'efficacité de la mesure. Malheureusement, jusqu'à ce jour, cette source d'information est rarement valorisée par une analyse globale et est généralement non académiques. Les principales occasions de traitement de ce sujet sont surtout les conférences nationales du programme Eolien Biodiversité, des publications ou revues de synthèse de bureaux d'études spécialisés dans ce domaine (Heitz C. et Jung L.2017, Beucher Y. Richou C., Albespy F. 2017), témoignant de réductions significatives de niveaux de mortalités par des approches pourtant empiriques.

1.3.5. Cadre réglementaire Français et évolution historique des prescriptions techniques qui concernent la mesure de de régulation

1.3.5.1.Cadre règlementaire

D'un point de vue réglementaire, la mesure de régulation en faveur des chauves-souris rentre dans le cadre des textes qui régissent l'ensemble des procédures d'intégration environnementale des parcs éoliens en phase de projet et en phase d'exploitation.

Les éoliennes terrestres industrielles sont soumises à autorisation d'exploiter comme Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) depuis le décret n°2011-984 du 23 août 2011. A ce titre, en phase de projet, elles sont soumises à l'obligation de produire une **étude d'impact sur l'environnement** conformément à l'article. L. 181-8 du code de l'environnement et le d) du 1. du tableau annexé à l'article R. 122-2). Cette étude, réalisée par ou sous la responsabilité du maître d'ouvrage du projet doit rendre compte des effets potentiels ou avérés sur l'environnement du projet éolien et permet d'analyser et de justifier les choix de mesures d'intégration environnementale retenus au regard des enjeux identifiés sur le territoire du projet. La mesure de régulation des éoliennes en faveur des chiroptères peut alors apparaître comme l'une

des mesures phares du déroulement de la doctrine « Eviter, Réduire, Compenser » (ERC) en faveur des chiroptères. Elle intervient comme une mesure de réduction des impacts attendus sur les chauves-souris et doit donc être étudiée, dimensionnée et justifiée pour le projet éolien notamment sur la base des éléments de l'état initial.

Lorsque le parc éolien est en phase d'exploitation, l'article 12 de l'arrêté du 26 août 2011 relatif à la nomenclature ICPE des éoliennes impose aussi la réalisation d'un **suivi d'impacts** de la biodiversité sur le long terme. « [...] Au moins une fois au cours des trois premières années de fonctionnement de l'installation puis une fois tous les dix ans, l'exploitant met en place un suivi environnemental permettant notamment d'estimer la mortalité de l'avifaune et des chiroptères due à la présence des aérogénérateurs. Lorsqu'un protocole de suivi environnemental est reconnu par le ministre chargé des installations classées, le suivi mis en place par l'exploitant est conforme à ce protocole. Ce suivi est tenu à disposition de l'inspection des installations classées [...] » (Journal Officiel n°198 du 27 août 2011). Dans ce contexte, la mesure de régulation des éoliennes en faveur des chauves-souris rentre à part entière dans le suivi en tant de mesure visant à maîtriser l'impact par mortalité des chiroptères. Le suivi est donc l'occasion de valider son intérêt, de tester sa bonne mise en œuvre et son efficacité et au besoin de corriger ou d'optimiser son dimensionnement.

A noter que l'article 12 du 26 août 2011 est modifié par l'Arrêté du 10 décembre 2021 - art. 11. Nous retiendrons entre autres, parmi les évolutions de ce texte que « [...] Sauf cas particulier justifié et faisant l'objet d'un accord du Préfet, ce suivi doit débuter dans les 12 mois qui suivent la mise en service industrielle de l'installation afin d'assurer un suivi sur un cycle biologique complet et continu adapté aux enjeux avifaune et chiroptères susceptibles d'être présents. Dans le cas d'une dérogation accordée par le Préfet, le suivi doit débuter au plus tard dans les 24 mois qui suivent la mise en service industrielle de l'installation. Ce suivi est renouvelé dans les 12 mois si le précédent suivi a mis en évidence un impact significatif et qu'il est nécessaire de vérifier l'efficacité des mesures correctives. A minima, le suivi est renouvelé tous les 10 ans d'exploitation de l'installation. [...] ». Là encore, la mesure de régulation des éoliennes en faveur des chauves-souris est directement concernée par cette évolution de 2021 du texte de loi qui oblige à une obligation de résultats et à une optimisation de la mesure tant qu'un « impact significatif » est mis en évidence. Précisons enfin à ce propos que l'arrêté du 22 juin 2020 précisait déjà que les résultats du suivi environnemental devaient être transmis dans les six mois suite à la dernière visite de terrain. Cela va aussi dans le sens du processus interannuel de maîtrise des impacts pour faire en sorte que les résultats de suivis d'une campagne puissent permettre d'engager rapidement une campagne de suivi successive si un impact significatif était constaté et que des mesures correctives étaient mises en œuvre.

Au-delà de ces principaux textes, la mesure de régulation des éoliennes en faveur des chauves-souris dépend aussi de la réglementation relative aux espèces protégées (articles L.411-1 et L.411-2 du Code de l'Environnement). En fonction des projets et des impacts attendus sur les espèces protégées, un dossier de demande de **dérogation au titre des espèces protégées** (DEP) peut aussi être exigé en parallèle de l'étude d'impact sur l'environnement s'il s'avère que le projet peut impacter des espèces protégées animales ou végétales, ou leurs habitats.

1.3.5.2. Prescriptions techniques

Ce cadre réglementaire est accompagné par différents guides et prescriptions techniques à l'échelle nationale ou régionale qui évoluent dans le temps et qui traitent notamment des modalités de réalisation des études d'impacts sur l'environnement des parcs éoliens, des études de suivis environnementaux des parcs éoliens ou des dossiers de demande de dérogation pour destruction d'espèces ou d'habitats d'espèces protégées. Pour ce qui concerne la mesure de régulation des éoliennes en faveur des chiroptères, les prescriptions techniques restent en général très peu détaillées de façon directe jusqu'à ce jour, aussi bien à l'échelle nationale que régionale.

Pour ce qui concerne l'étude d'impact, les différentes versions des Guides de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens (versions 2001, 2004, 2010, 2016, 2020) évoquent à peine ce type de mesure. Dans la version la plus récente (2020), nous retiendrons les passages suivants ; (

- Page 81 « [...] *En fonction des impacts bruts, si nécessaire mise en place d'une mesure de régulation des éoliennes (à titre d'exemple bridage des éoliennes pour certaines vitesses de vent, à certaines périodes de la nuit et de l'année soient citées), mise en drapeau... ; [...]* »
- de la page 110 « [...] *Le cas échéant et en fonction des niveaux d'impacts bruts, mesures de régulation des éoliennes en fonction de la période, de la vitesse du vent et de la température (les définir et au besoin faire une mise à jour annuelle), système de détection des chiroptères. [...]* ».

De façon indirecte, on peut toutefois y trouver aussi des prescriptions techniques concernant l'inventaire de l'état initial et notamment pour organiser l'étude de l'activité acoustique en continu et en altitude des chauves-souris. Ce type d'étude a en effet une place importante dans le dimensionnement de la mesure de régulation. Mais même pour ce type d'étude relevant de l'étude de l'état initial qui requiert une expertise technique pour maîtriser divers biais, la version la plus récente du Guide de l'étude d'impact se limite au passage suivant page 107 « [...] Dans le cas d'un parc éolien forestier ou en cas d'enjeux forts déterminés par l'analyse bibliographique ou premières expertises de terrain, notamment pour les espèces de haut vol, le recours à des enregistrements en altitude est nécessaire pour préciser la réalité des activités en altitude (au niveau de la zone de balayage des pales) et les risques inhérents. Ces informations sont utiles pour analyser précisément les risques d'impacts par mortalité et pour proposer des mesures adéquates et proportionnées par rapport à ces risques. [...] »

Pour ce qui concerne le suivi environnemental imposé par l'Article 12 de l'arrêté du 26 août 2011, la première version « reconnue par le ministre chargé des installations classées » est publiée en 2015. Cette première version officielle concerne indirectement la mesure de régulation des éoliennes en faveur des chiroptères car elle commence à cadrer les modalités de suivi de l'activité et de la mortalité des chauves-souris, dont les résultats vont alimenter le processus de régulation ou de test d'efficacité et d'optimisation de la mesure. Le suivi de la mortalité est initialement considéré comme le socle de la perception de l'impact généré par les éoliennes sur la faune volante. Cependant la pression d'échantillonnage des suivis est rapidement jugée insuffisante pour permettre des résultats pertinents (SFEPM 2016). Une version remaniée de ce protocole de suivi environnemental est alors produite en 2018.

Cette version 2018 cadre donc plus précisément les conditions des méthodes de suivi et les modalités de rendus des rapports, de façon à permettre un socle national minimum pour la qualité des études et limiter les nombreux biais méthodologiques inhérents à chacune de ces méthodes. On peut notamment souligner comme principales évolutions vis-à-vis des versions précédentes :

- La définition d'un **seuil minimum de 20 passages** annuels pour la recherche de mortalités au sol, réparties entre les semaines 20 et 43 (mi-mai à octobre),
- La prise en compte des **enjeux précisés au niveau de l'étude d'impact** pour faire évoluer au besoin cette pression de suivi de la mortalité,
- **L'obligation de faire engager un suivi d'activité ultrasonore des chauves-souris en continu (sans échantillonnage) et en hauteur** sur le site

Cette version donne donc une importance beaucoup plus marquée que la première au suivi de l'activité. L'intérêt de suivis couplant activité et mortalité est de limiter les biais de chaque méthode par une approche complémentaire. Ainsi ;

- Le **suivi de la mortalité** vise à qualifier un **niveau d'impact** généré par le parc éolien en termes de mortalités,
- Tandis que le **suivi d'activité en hauteur** vise plus à identifier un **niveau de risque** (d'exposition à la collision / barotraumatisme) sur le site à hauteur de rotor et **les conditions de risques** en corrélant ces données de vols des chauves-souris dans l'entourage du rotor avec des conditions climatiques.

C'est donc bien l'analyse croisée du risque, des conditions de risques et des impacts constatés qui est sensée permettre le choix de la création, du dimensionnement ou de l'optimisation de la mesure de régulation.

1.4. Régulation des éoliennes en faveur des chauves-souris : vocabulaire et définitions

1.4.1. Confusions et clarifications du vocabulaire utilisé

- **Bridage / Régulation** : les termes « Bridage » et « Régulation » des éoliennes sont tous deux utilisés pour désigner la mesure qui nous concerne. Mais le bridage est aussi utilisé à propos de la mesure de bridage acoustique qui consiste à modifier l'angle d'incidence du profil de la pale dans son écoulement et/ou réduire la vitesse du rotor de manière à réduire les bruits aérodynamiques qui sont la principale source de bruit des éoliennes. C'est donc bien la vitesse de rotation des éoliennes qui est alors bridée. Mais pour les chiroptères, la mesure consiste à faire mettre à l'arrêt ou quasiment à l'arrêt le rotor des éoliennes par pitching des pales (« mise en drapeau » parallèle à l'axe du vent). Les éoliennes étant alors considérées comme quasiment arrêtées, le terme de « Régulation » est plus juste. Il s'agit de la régulation de l'activité des éoliennes et non du bridage de leur vitesse de rotation utilisé pour l'impact sonore. C'est donc bien le terme « régulation » qui est utilisé tout au long de ce rapport.
- **Pattern / Algorithme** : les deux termes « pattern » de régulation ou « algorithme » de régulation peuvent être utilisés par la suite. Sur la base d'une perception plus ou moins fine des conditions de risques de mortalités des chauves-souris au niveau des éoliennes, les deux termes désignent l'ensemble des paramètres et des seuils de paramètres (seuils de vitesse de vent, de température, période, horaires...) utilisés pour réguler les éoliennes (les arrêter) lors de ces conditions de risque.
- **Mortalité brute, mortalité réelle ou estimée** : la mortalité de chauves-souris réellement générée par les éoliennes est très difficile à identifier très précisément. Au mieux cette mortalité est donc estimée (valeur supposée proche de la mortalité réelle) sur la base de la mortalité brute retrouvée sous les éoliennes, et en corrigeant cette dernière par une pondération des biais méthodologiques inhérents à ce type de suivi.
- **Rotor / Moyeu** : le « rotor » est partie tournante de l'éolienne (aussi appelée hélice). Il est composé des pales et du moyeu. Le « moyeu » est l'élément de jonction entre la pale et la machine, aussi appelé « nez » de l'éolienne, en amont de la nacelle.
- **Scada** : système de contrôle et d'acquisition de données en temps réel concernant notamment ici les mesures du bon fonctionnement des éoliennes, les mesures des paramètres climatiques, les ordres d'arrêts machines ...
- **Référentiel d'activité des chiroptères / Suivi de référence** : le « Référentiel d'activité » est le repère de classification générale d'intensité d'activité des chauves-souris nécessaire pour qualifier cette intensité d'activité de façon proportionnée entre les sites. Il est propre à chaque mode de caractérisation de l'activité (ex. pour un modèle d'enregistreur acoustique spécifique, pour un paramétrage spécifique, avec un critère d'analyse spécifique, pour une situation spécifique...). Le « suivi de référence » lui, correspond aux données d'activité relevées sur un site pendant une campagne de suivi pour faire le choix et dimensionner la mesure de régulation (en s'appuyant notamment sur le référentiel d'activité). cf. Figure 2 page suivante.

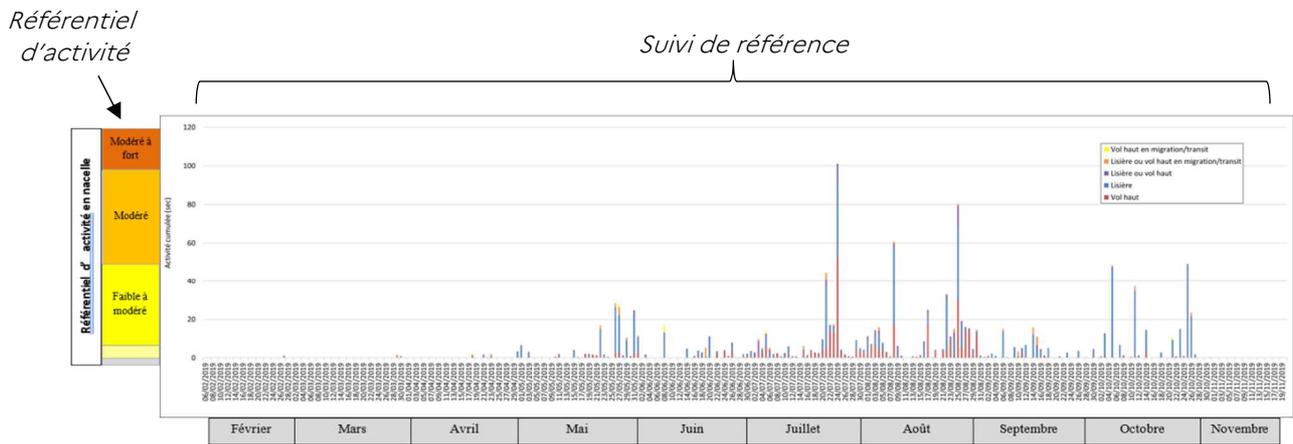


Figure 2 : Exemple de graphique permettant de distinguer le référentiel d'activité et de la suivi de référence

- **Espèce « patrimoniale »** : espèce à statut de conservation défavorable (menacée sur les listes UICN) et / ou protégée (niveau de protection régional, national, ou international).

1.4.2. Les différents modes de régulation

Quatre principaux modes de régulations sont considérés ici, chacun d'entre eux conditionnant l'activité nocturne des éoliennes à l'estimation de conditions de risques d'impacts sur les chauves-souris. Un pattern de régulation est alors implémenté au sein du parc éolien pour automatiser la mise à l'arrêt des éoliennes pour les conditions à risque. Chaque mode de régulation présente des intérêts et des contraintes à adapter en fonction de chaque situation.

1.4.2.1. Mode de régulation « sous seuil de production »

Pour que les éoliennes produisent de l'énergie, un seuil minimum de vitesse de vent est nécessaire pour entrainer une vitesse de rotation suffisante du rotor pour déclencher l'alternateur et la production d'énergie. Ce seuil de production dépend du modèle et du gabarit de l'éolienne.

Quand la vitesse de vent est inférieure à ce seuil de production, les éoliennes peuvent quand même tourner sans produire d'électricité si les pales ne sont pas pitchées (mises en drapeau). Or, la majorité des cas de mortalités des chauves-souris semble intervenir pour des vents faibles voire très faibles, notamment pour les mortalités liées à des phénomènes de pics d'activité en hauteur d'espèces de lisières (Langlois et al. 2017, Richardson 2021). **La régulation sous seuil de production** consiste donc simplement à faire en sorte que les pales d'éoliennes soient mises en drapeau tant que le seuil de production n'est pas atteint. L'intérêt de ce mode de régulation a été prouvé aux USA (Young 2011). L'intérêt évident de cette mesure est de permettre une réduction du risque de mortalité des chauves-souris sans aucune perte de production d'énergie.

1.4.2.2. Mode de régulation « préventif » ou « conventionnel »

Le mode de régulation « préventif » ou « conventionnel » est une mesure envisagée par défaut, en l'absence de perception fine des enjeux et des conditions de vols des chauves-souris à hauteur de rotor sur le site (absence de suivi en acoustique en continu en hauteur). Sans cette perception des conditions à risques, la mesure est dimensionnée de façon empirique sur la base d'un pattern de régulation qui a pu faire ses preuves sur des parcs éoliens alentours ou à une échelle plus large. Nous verrons par la suite (2.2.2 page 48) que les seuils de 6 m/s de vitesse de vent et 10°C de température sont souvent retenus. L'intérêt est de limiter les risques d'une surmortalité de façon préventive en première année d'exploitation du parc sans disposer d'une étude d'impact suffisamment fine pour adapter la mesure à la situation propre du site d'étude. L'efficacité de la mesure ne peut alors être appréciée qu'au moment de sa mise en œuvre, via un suivi environnemental fin, en risquant toutefois que ce pattern préventif ne corresponde pas réellement à la situation du site.

- **S'il est alors sous dimensionné par rapport à la réalité**, ou mal adapté aux espèces présentes et conditions de vols, il est susceptible d'induire une surmortalité des chauves-souris, au moins en première année, le temps que le suivi environnemental permette d'analyser l'efficacité de la mesure et de corriger le dimensionnement en fonction. Cependant le succès de cette phase d'optimisation différée n'est pas garanti dès la deuxième année d'exploitation (dépendant des espèces en présence, de leurs comportements de vols, mais aussi de la qualité du suivi environnemental, de l'interprétation des résultats...). Le risque concerne aussi l'exploitant et potentiellement l'équilibre financier du projet, puisqu'une révision à la hausse de la mesure devrait entraîner une perte de production excédentaire sur les années suivantes, et probablement pour la vie du projet, au-delà du prévisionnel estimé initialement en phase de conception.
- **S'il est alors surdimensionné**, c'est un moindre mal aussi bien pour les chiroptères que pour l'exploitant. Car les chauves-souris seront alors peu exposées aux conditions de risques du site et l'exploitant aura pu intégrer la perte de production générée par la mesure préventive dans son prévisionnel pour juger de son effet sur l'équilibre financier du projet. Dans le meilleur des cas pour l'exploitant, le pattern de régulation préventif peut alors théoriquement être revu à la baisse en mesure correctrice en deuxième année d'exploitation si le suivi environnemental démontre le surdimensionnement. Dans la pratique, nous verrons que cette perspective de révision à la baisse reste quand même difficile à valider par l'administration, même argumentée.

En l'absence de donnée d'analyse du risque propre au site, le choix du pattern à retenir peut faire l'objet de négociations entre le porteur de projet et l'administration, mais sans réel socle d'argumentation scientifique lié au site.

1.4.2.3. Mode de régulation « prédictif » ou « multicritères »

Le mode de régulation « prédictif » multicritères se veut proportionné aux conditions de risques locales. Il est dimensionné sur la base d'une perception fine des enjeux identifiés sur le site et des conditions pour lesquelles les risques de vols des chauves-souris à hauteurs de rotor sont les plus fortes. Cela suppose de disposer des résultats d'un suivi d'activité ultrasonore des chauves-souris en hauteur et en continu sur au moins une campagne d'activité de référence, à partir desquels les conditions de risques sont caractérisées aussi finement que possible par corrélation d'un grand volume de données d'activité avec les données climatiques. Selon les paramètres les plus influents pour caractériser le risque sur le site en question, un pattern de régulation **multicritères** est défini au cas par cas (selon les critères de vitesse de vent, de température, d'horaires, de période, voire de précipitations, d'orientation du vent, de pression atmosphérique, du point de rosé...). Plus le nombre de critères influents est important, plus fine est à la mesure, et moins elle est susceptible de générer des pertes de production.

L'avantage principal de ce mode de régulation est d'être adapté autant que possible au contexte local, en visant le meilleur compromis possible entre la maîtrise des risques de mortalité des chauves-souris et la maîtrise des pertes de production. Pour les chiroptères, ce compromis idéal n'est possible que si la perception des conditions de risque est juste et représentative. Il est donc conditionné ;

- Par la qualité des études engagées en amont (campagne de suivi acoustique en hauteur et en continu, campagne de suivi de la mortalité, pression d'échantillonnage, volume de données...),
- Par la qualité de l'analyse de l'expert chiroptérologue (ex. prise en compte des limites des études notamment pour l'interprétation des résultats),

- Par le caractère plus ou moins représentatif sur le long terme d'une campagne de suivi de référence.

Et si l'activité chiroptérologique est réellement prévisible avec les variables mesurées et avec un bon niveau de variance. Le risque de déviance de la mesure par rapport à la réalité (sur ou sous-dimensionnement) est logiquement moins élevé que pour une régulation préventive.

Pour l'exploitant, l'avantage de ce mode de régulation est non seulement de permettre une juste maîtrise des pertes de production mais aussi d'anticiper au mieux ses effets sur l'équilibre financier du projet (risque de sur ou sous dimensionnement maîtrisé). Toutefois, même si les conditions de risques sont caractérisées finement, cela ne signifie pas qu'elles vont forcément se traduire par une activité des chauves-souris à hauteur de rotor. Autrement dit, une part de la production d'électricité peut être perçue comme « perdue pour rien », mais qui intègre en fait la part de variabilité comportementale imprévisible. En pratique, la perte totale de production d'électricité par régulation prédictive semble faible (de l'ordre de 1 à 3% de la production globale d'après les exploitants).

Remarque : le mode de régulation proposé par l'application ProBat (modèle allemand Renebat) correspond au mode prédictif, puisque l'algorithme de régulation est dimensionné sur la base d'une estimation préalable des conditions de risques (via les données d'un suivi d'activité en hauteur). Il s'agit alors d'une **version standardisée du mode de régulation prédictif**. D'autres outils de modélisation de ce type vont probablement être amenés à se développer dans les années qui viennent. L'avantage principal réside dans la standardisation de la régulation à toutes les situations et donc un traitement homogène des parcs éoliens. Cela facilite alors aussi le travail d'analyse pour le chiroptérologue. Les contraintes sont aussi celles de cette standardisation. La pertinence de cette approche repose en effet sur la capacité et la finesse du modèle utilisé à représenter la diversité des situations à risque et des facteurs d'influence (espèces, comportements, paramètres climatiques...). Or la modélisation statistique de l'activité en hauteur des chauves-souris et donc des conditions de risques, est déjà très délicate à l'échelle d'un site (cf. volet 2). A ce stade des connaissances et des lacunes de connaissances sur l'écologie de vols en plein ciel des chiroptères, on peut s'interroger sur la pertinence d'une standardisation d'un modèle à large échelle. Enfin, dans la mesure où les analyses des conditions de risques ne sont plus réalisées par le chiroptérologue lui-même au cas par cas mais par un outil, si cet outil devient la seule source de dimensionnement, alors cette démarche limite aussi le chiroptérologue à progresser dans la connaissance sur l'écologie de vol des espèces et à délivrer un conseil conscient et argumenté à l'exploitant du parc éolien. Ce type d'outil standardisé peut néanmoins aider à la décision et servir de « garde-fou » en parallèle de la démarche d'analyse fine du chiroptérologue.

1.4.2.4. Mode de régulation « dynamique », en temps réel

Le mode de régulation « dynamique » consiste à faire arrêter les éoliennes en fonction d'une perception en temps réel de l'activité des chauves-souris. Il peut théoriquement être couplé au mode de régulation prédictif pour optimiser aussi bien la maîtrise du risque de mortalité des chauves-souris que celle de la perte de production. Ainsi, en théorie :

- Si les conditions à risques ne sont pas réunies pour engager un arrêt prédictif, mais que les chauves-souris sont quand même détectées à hauteur de rotor, alors le mode dynamique peut engager un arrêt machine et donc débrayer le mode prédictif pour améliorer la maîtrise du risque de mortalité.
- Si les conditions à risques sont réunies pour engager un arrêt prédictif, mais qu'aucune activité de chauves-souris n'est mesurée, alors le mode dynamique réactive la rotation des éoliennes, et donc débraye le mode prédictif malgré les conditions de risques pour réduire la perte de production.

Dans les deux cas, l'intérêt est celui d'une optimisation maximale du compromis entre perte de production et maîtrise de risque de mortalité des chauves-souris. Cela implique l'intervention de systèmes automatisés de détection et d'arrêt machine mis en œuvre tout au long de la vie du projet.

Les principales contraintes sont surtout liées au fait que la maîtrise des risques de mortalité ou de perte de production est directement dépendante de ces outils, et donc ;

- De leur qualité de détection en temps réel de l'activité des chauves-souris autour ou dans le rotor ;
- De leurs capacités de traitement des données ;
- De la pertinence du choix des paramètres d'activité des chauves-souris et des seuils conditionnant un arrêt machine (algorithme) ;
- Et de leur bonne mise en œuvre tout au long de la vie du projet (opérationnalité, gestion de communication entre les outils et le SCADA...).

Dans la pratique, pour des systèmes actuellement en phase de développement, leurs caractéristiques sont peu documentées et les outils de détection acoustique utilisés diffèrent souvent de ceux qui sont commercialisés pour les suivis acoustiques « classiques » en nacelles d'éoliennes. Or la capacité des outils à suivre en temps réel l'activité des chauves-souris est un point crucial dans un mode de régulation dynamique. Les suivis ultrasonores à partir de nacelles d'éoliennes sont en effet soumis à des contraintes techniques importantes. Tous les outils acoustiques présentent des limites de détection qui leurs sont propres et l'activité mesurée à hauteur de nacelles n'est jamais qu'une perception plus ou moins partielle de la réalité de l'activité. Dans le cadre d'une régulation prédictive, ces limites de détection sont moins prégnantes puisque le pattern de régulation est dimensionné sur la base d'un important volume de données d'activité recueillies lors des différentes conditions climatiques du suivi de référence. Les limites de détection sont donc alors au moins en partie compensées par le volume de données de référence si les comportements à risque se répètent pour des conditions cohérentes. Et la perception des conditions de risques peut être alors pertinente, même si les données prises indépendamment les unes des autres ne représentent toujours qu'une vision partielle de la réalité. Dans le cadre d'une régulation dynamique, comme il s'agit d'adapter l'arrêt des machines ou de débrayage de la régulation prédictive sur des relevés ponctuels ou sur l'absence de relevés ponctuels de l'activité des chauves-souris, les capacités et limites de détection des outils sont primordiales.

Au vu de ces éléments, dans le cadre d'un mode de régulation dynamique, les porteurs de projets et exploitants des parcs vont être attentifs à la capacité des systèmes à détecter et gérer les faux positifs susceptibles d'induire des pertes de production non justifiées, liés aux parasites acoustiques de l'ambiance sonore de l'éolienne (parasites principalement mécaniques ou électromagnétiques). Ils seront aussi attentifs à la pertinence de l'algorithme utilisé pour engager un arrêt machine alors que les conditions ne correspondent pas au pattern prédictif.

Les naturalistes et services instructeurs seront eux plus attentifs à l'effet des débrayages du pattern prédictif et donc la reprise de la rotation des éoliennes lors de conditions jugées à risque mais pour lesquelles les outils ne détectent pas d'activité acoustique. Les conséquences de cette réduction de la régulation prédictive sur la maîtrise des risques pourraient en effet varier selon les espèces, leurs comportements et leur détectabilité acoustique.

Concrètement, par exemple, si le pattern utilisé pour considérer une intrusion à risque et déclencher un ordre d'arrêt machine repose sur une mesure en continu de quelques minutes d'activité ultrasonore, il est probable que des transits ponctuels d'espèces patrimoniales de haut-vols (noctules) n'entraîneront par d'arrêt machines alors que l'activité de chasse de pipistrelles à la base du rotor le feront. Cet exemple est probablement simpliste, et les patterns utilisés sont probablement plus évolués ou tendent à le devenir (temporisation plus fine, pondération par des paramètres climatiques, classification acoustique des groupes d'espèces avec mesure différenciée...) mais il illustre combien le choix du pattern de régulation dynamique implique une vraie démarche d'analyse préalable et de prise en compte de la diversité des situations possibles sur chaque site. Or ces choix de patterns sont souvent définis par le constructeur de l'outil de régulation dynamique, et paramétrés dans l'outil sans présentation ou justification de leur pertinence par rapport au site en question.

Enfin comme évoqué plus haut pour la régulation prédictive basée sur un modèle et un outil de dimensionnement standardisé, ce type de traitement « à l'aveugle » des données peut limiter la progression des connaissances des chiroptérologues et ne permet pas une argumentation du choix des mesures dans les rapports. On peut toujours envisager de coupler ce type de mesure à une analyse fine du chiroptérologue, mais cela suppose de faire en sorte que l'algorithme de l'outil soit préalablement défini avec le chiroptérologue en charge du suivi du site, au cas par cas.

D'autres variantes de ces principaux modes de régulation, plus ou moins évolués, pourront être évoquées.

Remarque : en ce qui concerne les outils basés sur des **systèmes de détection vidéo** nocturne automatisés de l'activité des chauves-souris, ils peuvent aussi être utilisés en mode de régulation dynamique ou prédictif. L'image nocturne (infrarouge ou thermique) peut en effet caractériser l'activité des chauves-souris et donc les conditions de risques, avec ses propres limites (portée de détection, détermination des espèces, opérationnalité, traitement automatisé des vidéos...) et ses propres intérêts (vis-à-vis des espèces ou comportements à faible activité ultrasonore notamment). Ces différents modes de régulation restent encore à développer, perfectionner, tester et à adapter à des situations particulières, avec la progression des technologies et de la connaissance de l'écologie des espèces (ex. certains phyllostomidés ultramarins volant en plein ciel et sont très difficiles à détecter acoustiquement).

Le tableau 1 de la page suivante synthétise les principaux avantages et contraintes supposés des différents modes de régulation précités, tant en faveur de la protection des chiroptères que de la production d'énergie, et vers une démarche de recherche du meilleur compromis entre les deux.

Tableau 1 : Tableau des principaux avantages et contraintes identifiés des différents types de modes de régulation

Modes de régulation	Avantages				Contraintes			
	Pour les chiroptères et la maîtrise des risques de mortalités		Pour l'exploitant et la maîtrise des pertes de production d'énergie		Pour les chiroptères et la maîtrise des risques de mortalités		Pour l'exploitant et la maîtrise des pertes de production d'énergie	
Mode préventif sous seuil de production	++	Protection de l'activité par vent faible (qui peut être importante) Pas de biais lié à l'étude	+++	Aucune perte de production Mise en œuvre par l'exploitant sans frais	++	Pas de protection des vols par vents plus forts. Seuils de production de plus en plus faibles pour des éoliennes de plus en plus grandes	+	Faibles contraintes de veille du paramétrage. Mesure difficile à mettre en œuvre sur vieux modèles de machines (?)
Mode préventif à seuils conventionnel (empiriques)	++	Pas de biais lié à l'étude. Mesure plutôt conservatrice à défaut de perception fine du risque en hauteur	+	Solution alternative en l'absence de possibilité de suivi passif en hauteur	++	Exposition au risque non prise en compte sur des sites à enjeux particuliers (surtout pour la 1 ^{ère} année d'exploitation)	+++	Perte de production non justifiée si surdimensionné et difficulté de révision à la baisse par la suite. Risque de devoir rehausser le pattern en phase d'exploitation si sous-dimensionné
Mode prédictif (multicritères)	+++	Pattern de régulation proportionné aux enjeux et conditions de risques. Possibilité de contrôler l'effet de la mesure et l'optimiser en proportion	+++	Patterns de régulation multicritères limitent le risque de surdimensionnement et maîtrise de perte de production (1-3%)	+	Limite de représentativité de l'échantillon de référence, avec risque de sous dimensionnement en 1 ^{ère} année (tâtonnement). Efficacité dépendante de la qualité des études	++	Risque d'arrêt machine pour des conditions à risques, mais en l'absence de chauves-souris. Nécessité d'un suivi en hauteur en continu et d'une étude poussée des conditions à risque.
Mode dynamique ou dynamique / prédictif	++	Déclencher des arrêts machines au-delà des conditions du pattern prédictif si présence avérée de chauves-souris en temps réel	+++	Restreint les arrêts machine à une activité avérée des chauves-souris en temps réel (débrayage et donc optimisation du pattern prédictif)	+++	Pas de recul sur l'efficacité des outils. Or efficacité de maîtrise des risques dépendante des outils, de leur sensibilité, opérationnalité, paramétrages... En débrayant le pattern prédictif, prise de risque supplémentaire possible pour certaines espèces selon leur comportement	++	Risques de faux positifs et perte de production. Manque de retours d'expérience. Nécessité d'un suivi en hauteur en continu et d'une étude poussée des conditions à risque. Manque de transparence sur le pattern de régulation dynamique retenu

1.4.3. Les différentes étapes du processus de régulation par le jeu d'acteurs

Pour chacune des trois étapes du programme OPRECh, l'attention a été portée à la fois sur :

- La **phase de dimensionnement** du pattern de régulation, c'est-à-dire du choix du mode de régulation (sous seuil de production, conventionnel, prédictif et dynamique), des paramètres de l'algorithme (vitesse de vent, température, etc...) et des seuils de déclenchement les plus pertinents de ces paramètres ;
- La **phase de mise en œuvre** de la mesure, c'est-à-dire **l'implantation du pattern de régulation automatisé au niveau de l'éolienne** (en termes de paramétrage, de communication et interprétation des signaux d'arrêt ou de ralentissement des rotors, selon les modèles d'éoliennes, les contraintes techniques, économiques et de communication, etc...);
- La **phase de suivi d'efficacité et d'optimisation de la mesure** avec éventuelles évolutions du pattern selon l'efficacité mesurée (mesures correctives).

2. Volet 1 : Identifier les pratiques de la régulation des éoliennes en faveur des chauves-souris en France

2.1. Matériel et méthodes (volet 1)

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. Elle était initialement envisagée sur les premières étapes du programme mais vu l'ampleur et la difficulté largement sous-évaluées de la tâche, la diversité des interlocuteurs et l'inertie nécessaire pour recueillir ces informations, ce travail s'est finalement étalé tout au long de la vie du programme avec réception tardive d'une partie de l'échantillon d'études utilisées.

2.1.1. Trois objectifs principaux / trois principales bases de données

Au vu de la diversité des sources de données et des objectifs de présentation, 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 de traitement et 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 (recensement) pour **caractériser la situation nationale en termes de taux de parcs éoliens régulés par rapport à l'ensemble du parc éolien français**. Cette proportion nationale de parcs régulés / non régulés doit en effet permettre d'évaluer le stade de développement de la mesure en France. Elle peut permettre de caractériser le niveau d'engagement de la filière pour prendre en compte les chiroptères dans son développement. Après plus de 20 ans de développement éolien en France, la proportion des parcs régulés reste en effet inconnue tant au niveau des institutions publiques que des opérateurs éoliens. Concrètement, la constitution de cette base de données nécessitait d'abord de disposer de données fiables pour lister et identifier l'ensemble des parcs éoliens installés en France et pour chercher dans un deuxième temps, l'information, pour chacun d'entre eux, de l'existence ou non d'une mesure de régulation en faveur des chauves-souris.
- 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 un projet de renouvellement (repowering). Pour ce faire, 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. La base de données a été alors constituée sur la base d'un échantillonnage limité de rapports d'études. La nature et la consistance des informations sur la mesure de régulation sont très hétérogènes entre les rapports. La perception du processus a alors été complétée par divers entretiens téléphoniques (auprès de représentants de DREALS, bureaux d'étude, porteurs de projets, cf. Annexe 13), voire par la consultation de certains dossiers de demande de dérogation espèces protégées (DEP).
- 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'impact, notamment grâce à l'aide précieuse de nombreuses DREALS ou bureaux d'étude. Le nombre de rapports de suivis traités est ainsi bien plus conséquent que celui des études d'impacts. Cela reste cependant un échantillon partiel des études produites en France. Les données concernant la mesure de régulation sont aussi souvent plus détaillées au sein de ces rapports, ce qui permet une approche plus qualitative des pratiques pour des parcs exploités. Là encore, les consultations directes et entretiens avec les représentants des DREALS, bureaux d'études ou porteurs de projets auront permis de compléter l'analyse (cf. Annexe 13).

2.1.2. Constitution de la base de données « Taux de régulation nationale »

2.1.2.1. Sources des données

Les bases de données ont été construites via un recueil et une synthèse bibliographique de tous documents susceptibles d'indiquer si une mesure de régulation a été dimensionnée et mise en place ou non au niveau de chaque parc éolien français. Ce recueil bibliographique s'est appuyé sur la consultation de bases de données de référence, d'arrêtés préfectoraux, d'arrêtés préfectoraux complémentaires et autres documents administratifs ainsi que des rapports d'études d'impacts, de suivis d'impacts ou tout autre document informatif.

Le tableau 2 suivant présente les principales sources utilisées pour la construction de cette base de données.

Tableau 2 : Sources utilisées pour la création de la base de données nationale des parcs éoliens français faisant l'objet d'une régulation des éoliennes en faveur des chiroptères

Thématique	Lien	Description	Objet
Création d'une base de données des parcs éoliens construits de France	https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/registre-national-des-installations-de-production-et-de-stockage-deelectricite-au-30-04-2022/	Registre national des installations de production et de stockage d'électricité, mis à jour tous les ans. Version consultée du 31 décembre 2020.	Recueil de toutes les installations françaises de production d'énergie éolienne
	https://www.thewindpower.net/store_country_fr.php?id_zone=1	Base de données experte de données quantitatives et qualitative concernant les parcs éoliens de France, actualisée au moins deux fois par an. Version consultée : du 22 juin 2021	Recueil de toutes les informations pertinentes concernant les caractéristiques des parcs éoliens
	Occitanie : https://carto.picto-occitanie.fr/1/visualiseur_de_donnees_publicques.map Bretagne : https://geobretagne.fr/mapfishapp/ Auvergne-Rhône-Alpes : https://www.dataro.gouv.fr/accueil Bourgogne Franche-Comté : https://www.opteer.org/ Centre Val-de-Loire : https://carmen.developpement-durable.gouv.fr/index.php?map=DREAL24.map&service_idx=11 Grand-Est : https://carto2.geo-ide.din.developpement-durable.gouv.fr/frontoffice/?map=03ba65a0-71f4-4e17-996c-faa723abe733 Hauts-de-France : https://carto2.geo-ide.din.developpement-durable.gouv.fr/frontoffice/?map=232004cc-1491-4644-9920-dec062de6754#Descartes_aed6c388-f5b2-b961-2ef7-81292f150460tab6 Nouvelle-Aquitaine : https://carto.sigena.fr/1/carte_donnees_publicques_na.map Normandie : https://demp.dreal-norm.fr/ Provence-Alpes Côte d'Azur : https://batrame-paca.fr/recherche/territoire Pays de la Loire : https://carto.sigloire.fr/1/n_carte_patrimoine_r52.map	Visualisateurs de données en ligne des Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREALs)	Recueil de toutes les informations pertinentes concernant les caractéristiques des parcs éoliens construits
	https://www.projets-environnement.gouv.fr/pages/home/	Site de consultations de projets soumis à étude d'impact (pour les projets déposés depuis 2018)	Recueil de toutes les informations pertinentes concernant les caractéristiques des parcs éoliens en projets ou en cours de construction
	« departement ».gouv.fr	Sites gouvernementaux départementaux	Recueil des arrêtés préfectoraux et arrêtés préfectoraux complémentaires
https://www.georisques.gouv.fr/	Portail d'information sur les différents risques naturels, technologiques et installations classées.		
Agrémentation de la base de données avec des informations concernant la régulation en faveur des chiroptères	Occitanie : https://carto.picto-occitanie.fr/1/visualiseur_de_donnees_publicques.map Hauts-de-France : https://carto2.geo-ide.din.developpement-durable.gouv.fr/frontoffice/?map=232004cc-1491-4644-9920-dec062de6754#Descartes_aed6c388-f5b2-b961-2ef7-81292f150460tab6	Bases de données des DREALs	Recueil des arrêtés préfectoraux et arrêtés préfectoraux complémentaires et rapports de suivi d'impact
	https://www.mrae.developpement-durable.gouv.fr/	Sites internet des Missions régionales d'autorité environnementale de l'Inspection générale de l'Environnement et du Développement durable	Consultation des avis rendus sur projets des MRAE régionales
	Contact mail ou formulaire internet	Requête de consultation directe auprès des préfetures et des DREALs (99 préfetures et toutes les DREALs de France)	Obtention de documents administratifs et de rapports de suivis ou d'études d'impacts non disponibles en ligne

	Base de données interne EXEN Bureau d'études Ouest'Am ...	Requête de consultation auprès de bureaux d'études et autres institutions	Recueil de rapports de suivis, d'études d'impacts, de dossiers de dérogation « espèces protégées » ou tout autre document informatif
Constitution d'une base de données des projets éoliens et des mesures prévisionnelles de régulation des éoliennes	https://www.projets-environnement.gouv.fr/pages/home/	Site de consultations de projets soumis à étude d'impact (pour les projets déposés depuis 2018) Version consultée au 15 juillet 2021	Recueil des dossiers d'études d'impact concernant les parcs éoliens en projets ou en cours de construction

Une base de données a été créée pour les parcs éoliens construits au 31 décembre 2020 (BDD Taux de régulation national), et une autre base de données a été créée pour les parcs éoliens en instruction ou en cours de construction à cette même date (BDD Pratiques de la régulation / Projets éoliens). Ces deux bases de données comportent un onglet relatif aux caractéristiques de chaque parc éolien (nom du parc, dimension des éoliennes, modèle d'éolienne), ainsi que la référence à tout document administratif, ou tout rapport de bureau d'étude relatif à chaque parc éolien. Il est aussi précisé s'il est connu ou non, pour chaque parc, qu'une régulation a été prescrite par quelque document que ce soit.

Les références aux documents administratifs (arrêtés préfectoraux, arrêtés préfectoraux complémentaires, avis MRAe) sont liées à un onglet de la base de données fournissant des renseignements complémentaires sur les modalités de régulation et le dimensionnement de la mesure.

Les références aux rapports de bureaux d'études (suivis post-implantation, études d'impact, dossiers de dérogation, ...) sont liées à un autre onglet de la base de données faisant l'objet d'une analyse poussée du processus de décision et de dimensionnement de la mesure de régulation proposée par le bureau d'étude (BDD Pratiques de la régulation / Projets éoliens / Parcs exploités). De nombreuses informations y sont contenues, concernant aussi bien la phase amont de la mesure de régulation (modalités du suivi d'activité en hauteur, suivi de la mortalité, prescriptions et justifications du dimensionnement de la régulation), la phase de mise en œuvre de la mesure de régulation (critères temporels, climatiques, seuils retenus et mise en œuvre effective pour l'année suivant la phase de dimensionnement amont), la phase de suivi et de contrôle de la mesure (nouveau suivi d'activité en hauteur et suivi de mortalité, interprétation de l'effet de la régulation) et enfin la phase de préconisation de nouvelles mesures correctives le cas échéant (modification du plan de régulation). Cet onglet reprend donc toutes les démarches employées dans la création, la mise en œuvre et le test d'un plan de régulation des éoliennes en faveur des chiroptères.

2.1.2.2. Organisation de la base de données « BDD Taux de régulation national »

Une première base de données nommée « BDD Taux de régulation national » a donc été constituée pour tenter d'obtenir une vision large de l'adoption de la mesure de régulation des éoliennes en faveur des chiroptères en France. Cette base de données repose sur le Registre national des installations de production et de stockage d'électricité, répertoriant entre autres, de façon exhaustive, l'ensemble des sites de production d'énergie éolienne en France, au 31 décembre 2020. Au sein de ce registre, les parcs éoliens peuvent être découpés par entités administratives. Pour rassembler différentes entités sous un même nom de parc, les données de ce registre ont été complétées avec des informations de la base de données TheWindpower.net, issue de la filière Energie éolienne, et qui répertorie aussi les différents parcs éoliens à l'échelle internationale avec une actualisation deux fois par an.

La base de données ainsi constituée comporte 1227 parcs éoliens (rassemblant parfois plusieurs entités administratives) et 8261 éoliennes à l'échelle du territoire national (DOM-TOM inclus). Le nombre de parcs éoliens et le nombre d'éoliennes par région dans la base de données « BDD Taux de régulation national » sont indiqués dans le Tableau 3 ci-après. Cette base de données ne comporte que des parcs éoliens d'ores et déjà construits au 31 décembre 2020. Ce sont les régions Grand-est et Haut-de-France qui comptent le plus de parcs.

Tableau 3 : Nombre de parcs éoliens et nombre d'éoliennes recensés au niveau national dans la base de données « BDD Taux de régulation national ».

Le nombre de parcs éoliens peut différer des chiffres officiels au 31 décembre 2020 du fait de la considération ou non des entités administratives de chaque parc dans le calcul

Région	Nombre de parcs éoliens dans la base de données OPRECh	Nombre d'éoliennes dans la base de données OPRECh
Auvergne-Rhône-Alpes	52	382
Bourgogne-Franche-Comté	35	379
Bretagne	122	633
Centre-Val de Loire	85	537
Corse	2	30
Grand Est	224	1778
Guadeloupe	7	48
Hauts-de-France	308	2004
Île-de-France	9	50
La Réunion	2	68
Martinique	1	4
Normandie	83	409
Nouvelle-Aquitaine	86	525
Occitanie	100	819
Pays de la Loire	106	535
Provence-Alpes-Côte d'Azur	5	60
Total général	1227	8261

Cette trame a ensuite été complétée par les informations recueillies pour chacun des parcs dans le cadre du recensement national effectué : récolte d'arrêtés préfectoraux (AP), d'arrêtés préfectoraux complémentaires (APC), d'avis de la Mission Régionale d'Autorité Environnementale (MRAe), de dossiers de dérogations espèces protégées, de suivis d'impacts post-implantation ou de tout autre document relatif à des thématiques environnementales. Le type de document et le nombre de parcs pour lesquels des documents informatifs (relatifs à des mesures environnementales) ont été récoltés sont présentés dans le Tableau 4 avec un détail par région.

L'objectif principal de remplissage de la base de données « BDD Taux de régulation national » visait à définir si chaque parc éolien construit était régulé en faveur des chiroptères ou non. Des informations additionnelles, plus fines, concernant les modalités et le dimensionnement de la régulation ont été implémentées dans les autres bases de données développées en parallèle (BDD Pratiques de la régulation / Projets éoliens / Parcs exploités).

Tableau 4 : Nombre de parcs éoliens par région pour lesquels des documents informatifs (relatifs à des thématiques environnementales) ont été récoltés ou non pour la constitution de la base de données « BDD Taux de régulation national ».

AP : Arrêté préfectoral, APC : Arrêté préfectoral complémentaire, MRaE : Mission régionale d'autorité environnementale
Le nombre de parcs éoliens peut différer des chiffres officiels au 31 décembre 2020 du fait de la considération ou non des entités administratives de chaque parc dans le calcul

Région	Nombre de parcs sans information	Nombre de parcs avec au moins un AP/APC/avis MRaE	Nombre de parcs avec au moins un suivi post-implantation	Nombre de parcs avec AP/APC + suivi	Nombre de parcs avec infos / nombre de parcs sans information	Pourcentage de parcs avec à minima un document
Auvergne-Rhône-Alpes	20	8	17	7	32/52	62%
Bourgogne-Franche-Comté	22	10	1	2	13/35	37%
Bretagne	33	5	68	16	89/122	73%
Centre-Val de Loire	38	32	5	10	47/85	55%
Corse	2	0	0	0	0/2	0%
Grand Est	59	45	89	31	165/224	74%
Guadeloupe	7	0	0	0	0/7	0%
Hauts-de-France	152	67	69	20	156/308	51%
Île-de-France	6	3	0	0	3/9	33%
La Réunion	1	0	0	1	1/2	50%
Martinique	1	0	0	0	0/1	0%
Normandie	65	8	6	4	18/83	22%
Nouvelle-Aquitaine	40	31	10	5	46/86	53%
Occitanie	15	26	39	20	85/100	85%
Pays de la Loire	31	34	22	19	75/106	71%
Provence-Alpes-Côte d'Azur	3	1	1	0	2/5	40%
Total général	495	270	329	135	732/1227	60%

Globalement, des documents informatifs ont été récoltés pour 732 parcs éoliens sur 1227 présents dans la base de données. Cela représente 60 % des parcs éoliens sur le territoire national pour lesquels des documents relatifs aux thématiques environnementales ont pu être récoltés, et 40% pour lesquels aucun document n'a pu être recueilli. Ce tableau témoigne toutefois de fortes disparités entre régions concernant l'accès aux documents publics relatifs aux parcs éoliens. La carte suivante représente le pourcentage de données récoltées par régions de France métropolitaine (Figure 3).

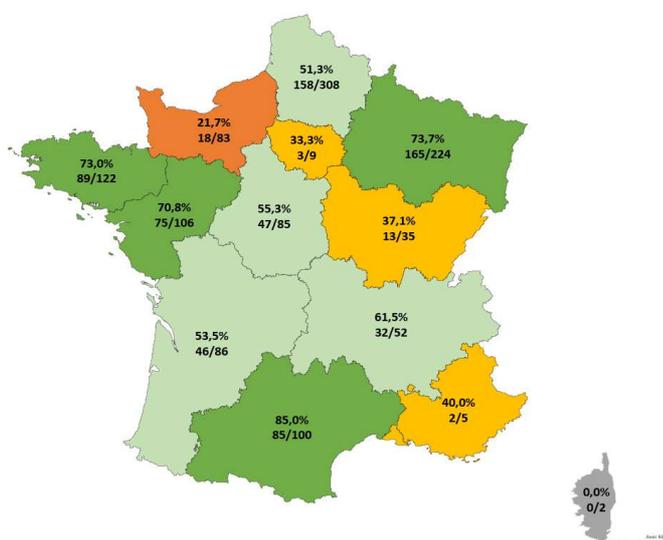


Figure 3 : Carte par régions du nombre et pourcentage de documents informatifs récoltés dans le cadre de la base de données « BDD Taux de régulation national »

Les régions pour lesquelles un maximum d'information a pu être récupéré sont les régions Occitanie (85% d'information pour 100 parcs éoliens), Grand Est (74 % d'information pour 224 parcs éoliens), Bretagne (73% d'information pour 122 parcs éoliens) et Pays de la Loire (71% d'information pour 106 parcs éoliens). Les régions Normandie et Bourgogne-Franche-Comté sont les régions les moins documentées avec respectivement 22% d'information pour 83 parcs et 37% d'information pour 35 parcs.

2.1.3. Constitution de la base de données « BDD Pratiques de la régulation / projets éoliens »

La base de données « BDD Pratiques de la régulation / projets éoliens » a été constituée afin d'obtenir une base prévisionnelle de la généralisation des mesures de régulation en faveur des chiroptères à l'échelle nationale pour les nouveaux projets éoliens. Cette base de données a été constituée à l'aide des données présentes sur le site projet-environnement.gouv.fr, site gouvernemental de consultations de projets soumis à étude d'impact (pour les projets déposés depuis 2018), et comporte donc les dossiers d'étude d'impact des projets éoliens les plus récents.

Le tableau suivant (Tableau 5) présente le nombre de projets éoliens analysés dans le cadre de la constitution de la base de données « BDD Pratiques de la régulation / projets éoliens ». Un total de 140 dossiers d'études d'impact a pu être analysé et concerne des projets de parcs récents pouvant être en construction, autorisés ou en instruction au moment de la rédaction de ce rapport. Les rapports d'étude d'impact sont mis à disposition du public au moment de l'enquête publique, mais ne sont pas systématiquement rassemblés à l'échelle nationale, régionale ou départementale, hormis via le site projet-environnement.gouv.fr.

Tableau 5 : Nombre de projets éoliens par région disponibles sur la plateforme projet-environnement.gouv.fr au 15 juillet 2021 et utilisés pour constituer la base de données « BDD Pratiques de la régulation / projets éoliens » et pourcentage associé vis-à-vis du total

Région	Nombre total de projets analysés	Pourcentage
Auvergne-Rhône-Alpes	1	1%
Bourgogne-Franche-Comté	6	4%
Bretagne	4	3%
Centre Val de Loire	3	2%
Grand Est	12	9%
Hauts de France	27	19%
La Réunion	1	1%
Martinique	1	1%
Normandie	4	3%
Nouvelle-Aquitaine	71	51%
Occitanie	4	3%
Pays de la Loire	6	4%
Total général	140	100%

La Figure 4 ci-dessous présente la répartition régionale des projets éoliens récents en France métropolitaine. Une grande majorité des projets éoliens sont prévus en région Nouvelle-Aquitaine (51%), ainsi que dans les Hauts-de-France (19%) et dans le Grand Est (9%).

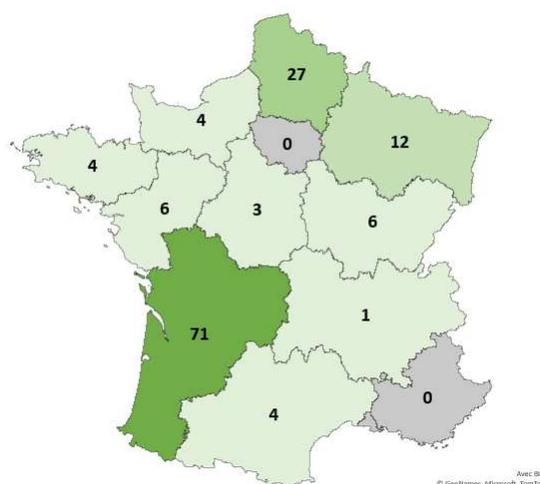


Figure 4 : Carte de répartition régionale du nombre de projets éoliens constituant la base de données « BDD Pratiques de la régulation / projets éoliens ».

L'analyse de ces dossiers d'étude d'impact (voire dossier DEP) a permis d'extraire les informations concernant les mesures de régulation des éoliennes prévues en faveur des chiroptères pour chacun des parcs de la base de données « BDD Pratiques de la régulation / projets éoliens ».

2.1.4. Constitution de la base de données « BDD Pratiques de la régulation / parcs exploités »

2.1.4.1. Echantillon de données

L'analyse détaillée des pratiques de la régulation est essentiellement basée sur l'analyse des rapports de suivis d'impacts des parcs en exploitation. Les rapports de suivis d'impacts des parcs en exploitation ou rapports de « suivi environnemental » sont rarement disponibles ou rassemblés et mis à disposition à l'échelle nationale, régionale et départementale. Une partie de ces rapports a alors pu être recueillie grâce à l'implication de la plupart des DREALs, de certains bureaux d'études et exploitants éoliens.

Finalement, la base de données exploitée ici s'appuie sur **559 rapports de suivis d'impacts**, concernant **406 parcs éoliens**, soit environ un tiers du parc éolien national installé. Certains parcs éoliens ont en effet fait l'objet de plusieurs campagnes de suivi annuelles qui concernent soit l'étude d'impact initiale, soit la première campagne de suivi d'impacts, soit plusieurs suivis d'impacts interannuels. En moyenne, la base de données concerne 1,3 campagnes de suivi annuels par parc. La grande majorité des rapports traités ne concerne qu'une seule campagne de suivi (étude d'impact ou suivi d'impact). Au maximum, certains parcs ont été suivis pendant quatre voire cinq campagnes annuelles. Les rapports qui concernent ces parcs suivis sur plusieurs années sont particulièrement intéressants à analyser pour apprécier l'évolution des processus de régulation et leur efficacité.

Sur le plan géographique, les études analysées concernent principalement les régions Grand-Est, Bretagne et Occitanie qui sont aussi logiquement des régions au plus fort développement éolien historique. Cela témoigne alors d'une bonne diversité géographique et d'une représentativité cohérente des données traitées. Cependant, en proportion (cf. figure suivante), certaines régions restent sous représentées (Hauts de France, Normandie, Centre-Val de Loire, Bourgogne Franche-Comté notamment). Les rapports les plus accessibles sont aussi souvent les plus anciens et les régions sous-représentées sont probablement celles pour lesquelles le développement éolien est le plus récent.

A noter qu'aucun rapport concernant des parcs éoliens outre-mer n'est pris en compte ici. La plupart de ces parcs ne relevait pas jusqu'à récemment du régime ICPE de l'autorisation mais du régime de la déclaration, ce qui n'a pas permis la mise en œuvre d'études standardisées par le passé.

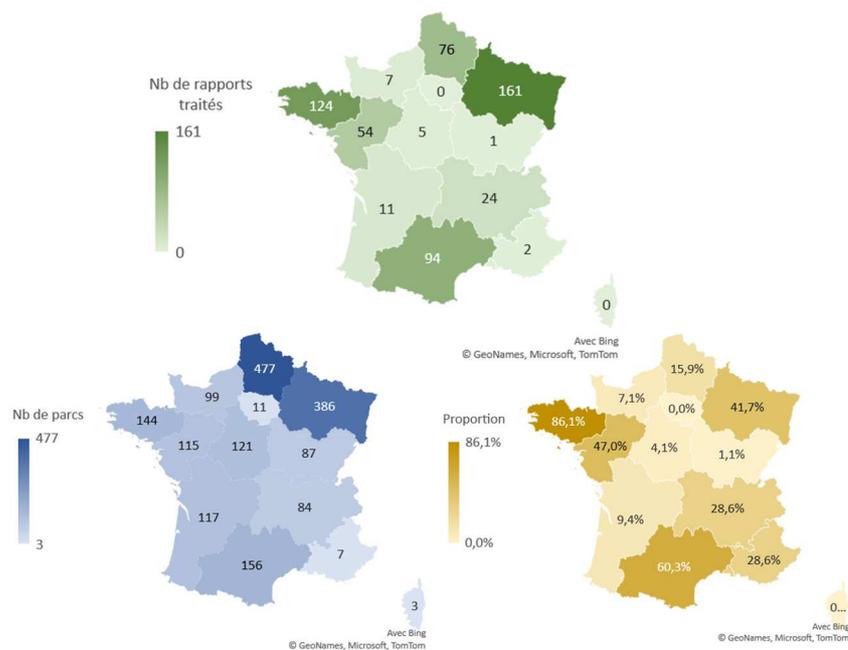


Figure 5 Répartition régionale de l'échantillon d'études utilisé pour qualifier les pratiques détaillées de la régulation en France (N=559)

(Nombre de rapports traités par région (gauche), nombre de parcs éoliens par région (centre), proportion de représentation de l'échantillon de données par régions (droite))

Sur le plan temporel, comparé à l'évolution des principales prescriptions techniques à l'échelle nationale, la majeure partie des rapports traités provient d'études réalisées entre 2015 et 2018, alors que la première version du protocole de suivi environnemental était en vigueur. Le fait qu'il y en ait moins de rapports traités après 2018 témoigne d'une certaine inertie dans la mise à disposition des rapports d'études les plus récents depuis le bureau d'étude ou l'association naturaliste qui mènent l'étude, le porteur de projet ou l'exploitant, vers l'administration et les éventuelles phases de synthèses départementales ou régionales qui s'ensuivent. On peut aussi rappeler que l'obligation pour l'exploitant de produire son rapport de suivi environnemental « [...] au plus tard 6 mois après la dernière campagne de prospection [...] » ne date que de 2020 (Arrêté du 22 juin 2020 modifiant l'arrêté du 26 août 2022 relatif aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent au sein d'une installation soumise à déclaration au titre de la rubrique 2980 de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement).

Le graphique suivant ne concerne que 549 des 559 rapports traités. 10 rapports présentent en effet des résultats à cheval sur plusieurs années de suivis et notamment à cheval sur ces trois périodes charnières d'évolution des prescriptions nationales en termes de suivis d'impacts éoliens sur la biodiversité.

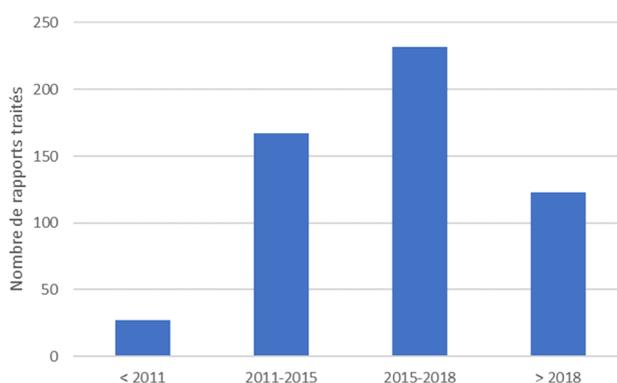


Figure 6 Répartition temporelle des études de suivis d'impacts analysées (N=549) (2011 = ICPE ; 2015 : Protocole National ; 2018 : Mise à jour du Protocole National)

Concernant la diversité des rédacteurs de ces 559 rapports, ils ont été rédigés par 74 organismes (bureaux d'étude, associations naturalistes, consultants...) ou associations d'organismes (partage des volets d'études). A l'échelle régionale, ces études sont aussi plutôt largement réparties entre ces différents organismes. On peut toutefois noter une surreprésentation de certains organismes localement. C'est le cas du bureau Exen en régions Occitanie où les rapports ont pu être facilement mobilisés pour OPRECh dans la mesure où Exen est l'un des trois partenaires du programme. Cette facilité de mobilisation des études biaise un peu cette représentation. Parmi les autres organismes les mieux représentés, on note aussi les CPIE et des bureaux d'étude Airele et Biotope en régions Grand-Est et Haut-de France, le bureau d'étude Ouest'Am en Bretagne et Pays-de-la-Loire, ou encore les délégations LPO en Pays-de-la-Loire et Occitanie.

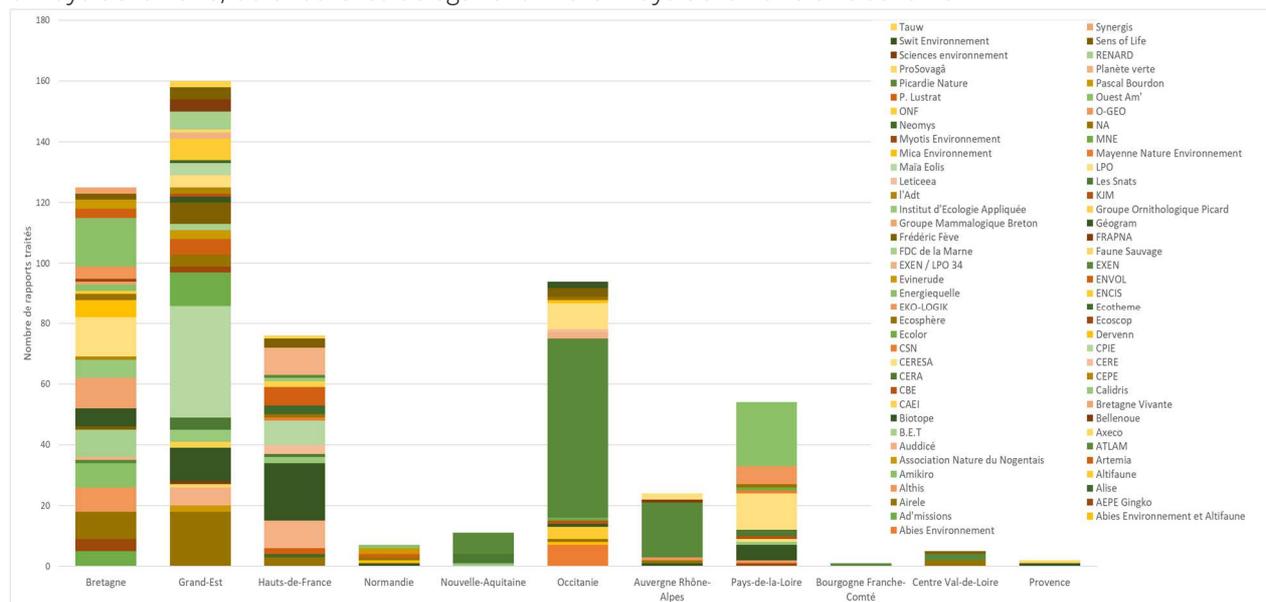


Figure 7 Répartition régionale des auteurs des études analysées (N=559)

2.1.4.2. Organisation de la base de données « BDD Pratiques de la régulation / parc exploités »

La base de données issue des rapports de suivis d'impact (rapports de suivis environnementaux) est la plus fournie. Elle comprend donc 559 lignes. Chaque ligne correspond à un parc éolien et à un rapport de suivi annuel ou pluriannuel. De façon générale, chaque année de suivi fait l'objet de rapports distincts. Chaque ligne distingue donc la situation d'un parc éolien pour une année. Les données sont saisies sur plusieurs lignes si le parc éolien est suivi au cours de plusieurs campagnes à l'origine de plusieurs rapports. Cependant si les suivis pluriannuels sont à l'origine d'un seul rapport, les données sont saisies sur une seule ligne. Il n'a pas en effet été question de tenter de décomposer ici certaines présentations pluriannuelles de ces rapports. Cela aurait été impossible de le faire puisque les résultats eux-mêmes ne sont pas toujours décomposés par années au sien de ces rapports.

Parfois, une même année de suivi a fait l'objet de plusieurs rapports distincts. C'est par exemple le cas quand un organisme est missionné pour réaliser le suivi de la mortalité, ou un suivi comportemental des oiseaux et qu'un autre organisme est missionné pour prendre en charge le suivi d'activité ultrasonore en hauteur. Dans ce cas-là, les données des deux rapports sont saisies sur la même ligne puisqu'il s'agit d'une même campagne de suivi pour un même parc éolien.

La base de données comprend 262 colonnes, réparties en cinq grands thèmes, présentés par une approche chronologique vis-à-vis de la mesure de régulation (en amont pour sa phase de conception, pour sa mise en œuvre ou en aval pour les phases de tests / évaluation / optimisation). Les titres de colonnes sont présentés de façon détaillée en annexe 1, en gardant le même jeu de couleurs que la figure de synthèse suivante, par grands thèmes.

La base de données « BDD Pratiques de la régulation / parcs exploités » distingue donc 146 458 cellules de données potentielles (262 X 559). Mais toutes les cellules ne sont pas remplies : selon que le rapport concerne la phase de conception initiale de la mesure ou la phase de test / contrôle de la mesure, seules les cellules des thèmes respectifs sont renseignées. Finalement, 46 266 cellules de données ont ainsi été saisies à la lecture des différents rapports (soit 32% des capacités de la base de données).

Les premiers thèmes traités concernent la description du parc ou projet éolien et l'identification du rapport. Ces données offrent la possibilité de croiser les analyses des pratiques de la mesure avec le gabarit des éoliennes ou selon le type d'étude réalisée.

Tableau 6 Données de la « BDD Pratiques de la régulation » pour les thèmes 1 et 2 présentations du parc et du rapport

Thème	Sous-thème	Nb de colonnes	Informations présentées
1/	Description du projet / parc éolien	12	Nom du parc, année de mise en service, données de localisation, données de modèles et de gabarit des éoliennes (garde au sol, hauteur...)
2/	Description de l'étude traitée et identification de la personne qui a lu et traité le rapport	12	Code identifiant de l'étude, types d'étude (étude d'impact, suivi d'impact.), organisme missionné, année, identifiant de la personne qui a traité ce rapport, date...

Le troisième thème cible les données qui permettent de qualifier le processus de conception et de dimensionnement initial de la mesure.

- Cela concerne notamment les projets éoliens pour lesquels un projet de mesure de régulation est envisagé dans le cadre de l'étude d'impact. Dans ce cas, les données qui permettent de comprendre le processus de dimensionnement de la mesure sont notamment recherchées au niveau du suivi d'activité acoustique en hauteur (sur mât de mesure de vent, en canopée...) si ce suivi existe. Cependant parfois, la mesure est retenue sans ce type de suivi préalable et il s'agit alors d'identifier les données de base utilisées (suivis acoustiques par échantillonnage de visites au sol, mesure préventive...).
- Cela concerne aussi les parcs éoliens déjà en exploitation mais sans mesure de régulation engagée. Dans ce cas-là, le processus de conception de la mesure peut alors reposer sur les résultats d'un suivi acoustique en hauteur (en nacelle, voire mât de mesure), sur les résultats d'un suivi de la mortalité, ou sur les deux types de suivis.

Tableau 7 Données de la « BDD Pratiques de la régulation » pour le thème 3 : processus de conception initiale de la mesure

Thème	Sous-thème	Nb de colonnes	Informations présentées
3/ Processus initial de prise de décision et de dimensionnement de la mesure (phase 0, aucune mesure n'est encore en œuvre, conception initiale pour un projet ou pour un parc exploité sans mesure)	Si la mesure est conçue sans suivi d'activité en hauteur ni suivi de la mortalité (étude d'impact, négociations amont...)	3	Contexte de la conception de la mesure (étude d'impact, renouvellement, demande de l'administration), Si basé sur des passages de chiroptérologue au sol, alors année et nombre de passages
	Si la mesure est conçue sur la base d'un suivi d'activité ultrasonore en hauteur -> méthode	11	Année, organisme, dates et durée du suivi, suivi en continu ou par périodes, support (mât, éolienne, canopée...), nombre de d'enregistreurs, modèle d'enregistreur utilisé...
	Si la mesure est conçue sur la base d'un suivi d'activité ultrasonore en hauteur -> présentation des résultats	15	Mode de présentation des résultats, nombre d'espèces, nombres d'espèces patrimoniales de haut vol, analyse comportementale, pics d'activité, utilisation d'un référentiel, corrélations avec paramètres climatiques, niveau d'activité...
	Si la mesure est conçue sur la base d'un suivi de la mortalité -> méthode	9	Année, organisme, dates et durée du suivi, nombre d'éoliennes suivies, nombre de passages, nombre de tests coefficients correcteurs, prise en compte de la végétation...
	Si la mesure est conçue sur la base d'un suivi de la mortalité -> présentation des résultats	13	Nb de mortalités brutes (chauves-souris), nb d'espèces impactées, nb d'espèces patrimoniales de haut vol, analyse de pics de mortalités, nb de mortalités brutes par passages par éoliennes, taux de mortalité, intervalles de confiance, comparaisons avec d'autres parcs ou interannuelles...
	Modalités de prescription et justification du dimensionnement de la mesure, objectifs recherchés	22	Analyse activité / mortalités, prescription pour l'année suivante ou la campagne en cours, précision du pattern, distinction de périodes, prescription claire ou choix ouverts, simulations / justification de l'effet prévisionnel de la mesure (taux de protection des seuils climatiques retenus, niveau d'activité résiduelle à risque, seuils pris indépendamment ou couplés, distinction par espèces ou groupes d'espèces, prise en compte des effets cumulés, pics d'activité, espèce patrimoniale particulière, autres objectifs...)

Le thème 4 est consacré à la description proprement dite du pattern de régulation. Cela correspond au pattern retenu suite au processus de conception initiale (thème 3) pour un projet ou un parc non régulé. Mais dans le cadre d'un suivi post-implantation d'un parc régulé, le pattern indiqué correspond à celui qui est implémenté et testé.

Tableau 8 Données de la « BDD Pratiques de la régulation » pour le thème 4 : caractéristiques de la mesure de régulation (pattern)

Thème	Sous-thème	Nb de colonnes	Informations présentées
4/ Caractéristiques de la mesure de régulation retenue suite au processus initial (partie précédente) ou bien mise en œuvre sur le parc et testée (partie suivante)	Quel type de régulation	4	1 ^{ère} conception / test, idem / différente que celle préconisée, conventionnel, prédictif, dynamique
	Critères temporels	12	Durée, décomposition par saisons, nb de périodes, précision des heures d'activation / arrêt ou horaires par rapport au lever / coucher de soleil...
	Critères climatiques	7	Nb de critères pris en compte, vent, température, orientation du vent, pluie, autre...
	Critères éoliennes	3	Mesure uniforme pour tout le parc ou par éoliennes, justification
	Précision seuils vitesse de vent	24	Valeurs des seuils de vitesse de vent retenus par 15 jours
	Précision seuils température	24	Valeurs des seuils de température retenus par 15 jours
	Autres mesures prescrites	6	Liées aux milieux, à l'éclairage, renouvellement des suivis, autres...

Le thème 5 cible des données très comparables à celles du thème 3, mais pour la **phase de test de la mesure (données du suivi d'activité et du suivi de mortalité)**. La différence tient principalement à :

- Des colonnes qui visent à interpréter l'effet de la mesure sur la mortalité des chauves-souris par rapport à la situation du parc non régulé, ou bien par rapport à la situation du parc qui bénéficierait d'un autre pattern de régulation (suivi de l'optimisation de la mesure). Ces colonnes ne peuvent être remplies que lorsqu'un parc bénéficie de plusieurs années de suivis. Cela ne représente donc qu'une partie de l'échantillon disponible. Si ce travail d'analyse de l'évolution des mortalités en fonction de la mesure de régulation n'est pas directement traité dans les rapports, il est mené au sein de la base de données par croisement automatisé des différents paramètres de qualification de la mortalité entre les deux campagnes suivies (taux de mortalité, mortalités brutes...).
- Des colonnes qui ciblent la question de la mise en œuvre effective de la mesure au sein du parc éolien. Il s'agit ici de vérifier si les rapports prennent bien en compte le fait qu'un problème de mise en œuvre (implémentation) de la mesure peut remettre en question son efficacité et dans cet objectif, quels sont les moyens utilisés pour contrôler ce point a posteriori ?

Tableau 9 Données de la « BDD Pratiques de la régulation » pour le thème 5 : processus de suivi / contrôle de la mesure

Thème	Sous-thème	Nb de colonnes	Informations présentées
5/ Processus de suivi / contrôle de la mesure (phase 1 ou +, mesure engagée à tester, évaluation, optimisation)	Si la mesure est testée sur la base d'un suivi d'activité ultrasonore en hauteur -> méthode	12	Année, organisme, dates et durée du suivi, suivi en continu ou par périodes, support (mât, éolienne, canopée...), nombre de d'enregistreurs, modèle d'enregistreur utilisé...
	Si la mesure est testée sur la base d'un suivi d'activité ultrasonore en hauteur -> présentation des résultats	16	Mode de présentation des résultats, nombre d'espèces, nombres d'espèces patrimoniales de haut vol, analyse comportementale, pics d'activité, utilisation d'un référentiel, corrélations avec paramètres climatiques, niveau d'activité, analyse évolution interannuelle, synthèse...
	Si la mesure est testée sur la base d'un suivi de la mortalité -> méthode	9	Année, organisme, dates et durée du suivi, nombre d'éoliennes suivies, nombre de passages, nombre de tests coefficients correcteurs, prise en compte de la végétation...
	Si la mesure est testée sur la base d'un suivi de la mortalité -> présentation des résultats	14	Nb de mortalités brutes (chauves-souris), nb d'espèces impactées, nb d'espèces patrimoniales de haut vol, analyse de pics de mortalités, nb de mortalités brutes par passages par éoliennes, taux de mortalité, intervalles de confiance, comparaisons avec d'autres parcs ou interannuelles...
	Interprétation sur l'effet de la mesure sur la mortalité (traitement OPRECh)	22	Evolution des critères de mortalité (taux, mortalité brute...) entre avant et après mise en œuvre de la mesure, ou entre une année de test et une autre, nombre d'espèces concernées, ciblage des espèces patrimoniales de haut vol, pics d'activité...

	Interprétation de l'effet de la mesure (par l'auteur de l'étude)	2	Conclusion sur succès, échec, ou succès partiel, interprétation avancée
	Rétrocontrôle de la bonne mise en œuvre de la mesure sur le parc éolien	4	Analyse croisée activité / mortalités / régulation, analyse croisée activité des éoliennes / données climatiques pour cohérence de mise en œuvre de la mesure, écarts constatés, infos dysfonctionnements...

Le dernier **thème 6 traite des données qui caractérisent le processus de validation ou d'optimisation** de la mesure suite à une campagne de test (mesure corrective).

Tableau 10 Données de la « BDD Pratiques de la régulation » pour le thème 6 : processus de validation / optimisation de la mesure

Thème	Sous-thème	Nb de colonnes	Informations présentées
6/ Modalités de validation ou prescription d'évolution de la mesure (mesure corrective), justification	Prescription d'évolution de la mesure (pattern)	6	Reconduite tel que, revu à la hausse, à la baisse, prescription pour l'année suivante ou la campagne en cours
	Justification des choix retenus, objectifs recherchés	17	Précision du pattern, distinction de périodes, prescription claire ou choix ouverts, simulations / justification de l'effet prévisionnel de la mesure (taux de protection des seuils climatiques retenus, niveau d'activité résiduelle à risque, seuils pris indépendamment ou couplés, distinction par espèces ou groupes d'espèces, prise en compte des effets cumulés, pics d'activité, espèce patrimoniale particulière, autres objectifs...)
	Autres mesures prescrites	5	Liées aux milieux, à l'éclairage, renouvellement des suivis, autres...

2.1.5. Autres sources de données : interviews

Des demandes de contact ont été envoyées à chacune des DREALS de France dans le but d'obtenir un entretien avec des personnes référentes en matière d'éolien terrestre pour chaque région concernée. Les DREALS de la plupart des régions de fort développement ont répondu favorablement et ont pu faire l'objet d'une interview (DREALS Occitanie, Haut de France, Grand Est, Centre Val de Loire, DEAL Guadeloupe, etc.). (Cf. liste de l'annexe 13).

Un questionnaire comprenant une trentaine de questions a été élaboré afin de cadrer l'interview et parcourir les différentes phases du processus de régulation des éoliennes en faveur des chiroptères, de sa conception, au suivi d'efficacité de la mesure en passant par sa mise en œuvre (cf. formulaire en Annexe 13). Il s'agissait surtout de cadrer l'interview sur les différentes phases du processus tout en laissant l'interlocuteur s'exprimer librement sur ses propres perceptions des principales contraintes et leviers au développement de mesures efficaces et proportionnées à l'échelle régionale et / ou nationale.

Les entretiens ont duré entre une heure et une heure et demie et ont pu faire intervenir plusieurs personnes d'un même service. Ces entretiens avec les personnes référentes des DREALS ont souvent permis de déboucher sur l'acquisition de rapports d'études pour compléter les bases de données.

Le même type d'entretiens a aussi été réalisé avec quelques bureaux d'étude impliqués régulièrement dans le processus de régulation des éoliennes en faveur des chauves-souris (Ouest'Am, Calidris, KJM conseil, ...). (Cf. liste de l'annexe 13).

2.2. Résultats (volet 1)

2.2.1. Quel est le stade de développement de la mesure en France ? (recensement)

2.2.1.1. Quelle proportion du parc éolien Français est régulée en faveur des chauves-souris ?

2.2.1.1.1. Echelle nationale

Aucun document informatif n'a pu être récolté pour 495 parcs éoliens sur les 1227 parcs éoliens constituant la base de données « BDD Taux de régulation national ». Un ou plusieurs documents réglementaires ont pu être recueillis pour 732 parcs éoliens. Un parc éolien a été considéré comme régulé si au moins un des documents relatifs au parc faisait mention d'une régulation en faveur des chiroptères. Ce recensement ne prend donc pas en compte les parcs qui sont régulés mais pour lesquels aucun document (arrêté préfectoral ou rapport de bureau d'étude) n'a été émis mentionnant cette régulation. D'après les exploitants, cela peut en effet arriver.

Le tableau suivant (Tableau 11) présente le nombre de parcs éoliens régulés, non régulés ou sans information au sein de la base de données « BDD Taux de régulation national ». Le tableau présente aussi le nombre d'éoliennes régulées afin de s'affranchir des biais pouvant être causés par la taille des parcs éoliens et le nombre d'entités administratives composant chaque parc.

Tableau 11 : Nombre de parcs éoliens et d'éoliennes régulés, non régulés ou sans information dans la base de données « BDD Taux de régulation national »

Parc régulé ?	Nombre de parcs	Nombre d'éoliennes
Sans information	495	3059
Non	411	2925
Oui	321	2277
Total	1227	8261

Il apparaît qu'au moins 321 parcs éoliens sur les 1227 présents dans la base de données ont mis en place une régulation en faveur des chiroptères. 411 autres parcs éoliens pour lesquels des documents récents ont pu être récoltés ne sont pas régulés en faveur des chiroptères. En considérant le nombre d'éoliennes par parc, cela représente au moins 2277 éoliennes régulées en faveur des chiroptères sur les 8261 de la base de données, tandis que 2925 éoliennes ne font pas l'objet d'une régulation.

La Figure 8 ci-après présente la proportion de parcs régulés, non régulés ou de statut inconnu à l'échelle nationale d'après la base de données « BDD Taux de régulation national ». La figure de droite présente plus précisément la proportion de parcs éoliens régulés et non régulés en excluant les parcs sans information. La Figure 9 présente les mêmes éléments en considérant le nombre d'éoliennes composant chaque parc.

Si on considère l'échantillon de données excluant les parcs sans information comme représentatif de la situation nationale, il apparaît qu'environ 44 % des parcs éoliens seraient régulés en faveur des chiroptères à l'échelle nationale et 56% ne le seraient pas. Il s'agit toutefois de noter que les parcs considérés comme non régulés peuvent en réalité être régulés, mais qu'aucun document recueilli et consulté dans le cadre de cette étude n'en atteste. En considérant le nombre d'éoliennes de chaque parc, cette proportion ne change pas, avec 44% des éoliennes régulées en faveur des chiroptères sur le territoire national, en excluant les éoliennes pour lesquelles aucune information n'a pu être collectée.

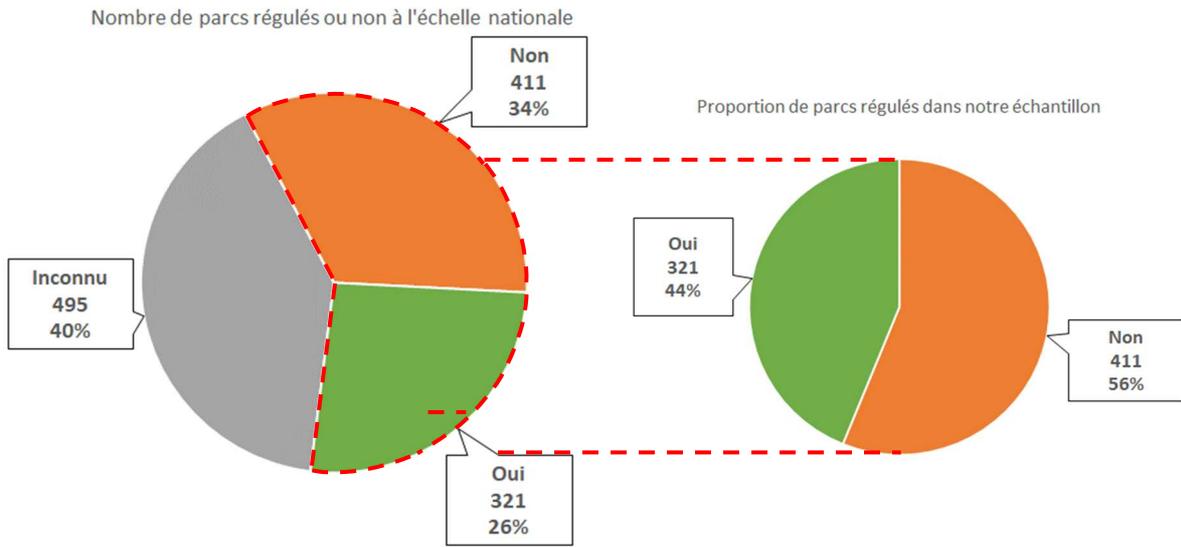


Figure 8 : Proportions de parcs régulés, non régulés ou de statut inconnu en France (gauche) et proportions en excluant les parcs sans information (droite)

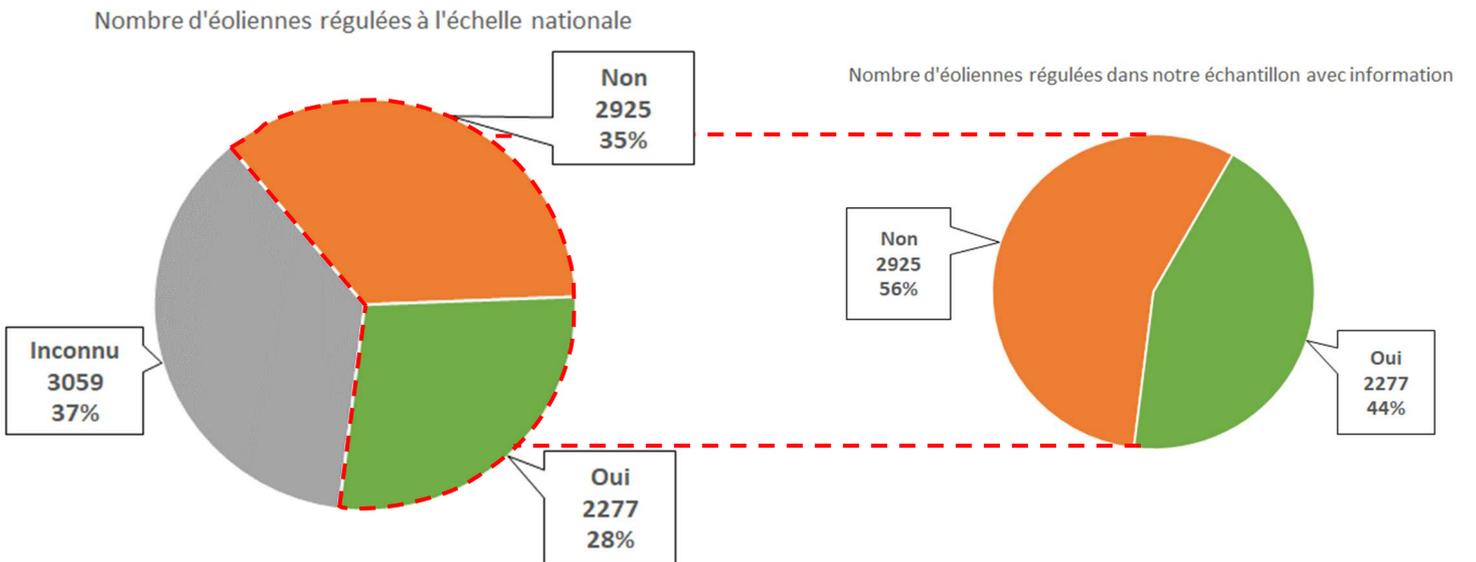


Figure 9 : Proportions d'éoliennes régulées, non régulées ou de statut inconnu en France (gauche) et proportions en excluant les parcs sans information (à droite)

2.2.1.1.2. Disparités régionales

L'analyse a ensuite été déclinée à l'échelle régionale en prenant en compte le nombre de parcs éoliens régulés en faveur des chiroptères en fonction du nombre de parcs éoliens avec information. Pour plus de clarté, les parcs éoliens sans aucun document informatif ne sont pas inclus dans les analyses suivantes.

Le tableau ci-dessous (Tableau 12) présente le nombre de parcs éoliens régulés en faveur des chiroptères par région et le pourcentage associé vis-à-vis du nombre de parcs éoliens avec information présents dans la base de données « BDD Taux de régulation national ». Le tableau présente aussi la même analyse en considérant le nombre d'éoliennes régulées ou non régulées par région.

Tableau 12 : Nombre de parcs éoliens régulés en faveur des chiroptères par région française et pourcentage associé

Région	Nombre de parcs régulés / nombre de parcs avec information	Pourcentage de parcs régulés	Nombre d'éoliennes régulées / nombre d'éoliennes avec information	Pourcentage d'éoliennes régulées
Auvergne-Rhône-Alpes	17/31	55%	146/239	61%
Bourgogne-Franche-Comté	5/13	38%	48/154	31%
Bretagne	33/88	38%	176/487	36%
Centre-Val de Loire	29/47	62%	211/343	62%
Corse	0/0	0%	0/0	0%
Grand Est	63/166	38%	515/1332	39%
Guadeloupe	0/0	0%	0/0	0%
Hauts-de-France	40/155	26%	278/1094	25%
Île-de-France	1/3	33%	6/15	40%
La Réunion	0/1	0%	0/37	0%
Martinique	0/0	0%	0/0	0%
Normandie	13/19	68%	77/105	73%
Nouvelle-Aquitaine	26/46	57%	148/285	52%
Occitanie	49/85	58%	437/728	60%
Pays de la Loire	43/75	57%	204/349	58%
Provence-Alpes-Côte d'Azur	2/3	67%	31/34	91%

Les régions possédant le plus fort pourcentage de parcs éoliens régulés sont les régions Occitanie, Centre-Val-de-Loire, Normandie et Provence, cette dernière région possédant toutefois un nombre réduit de parcs éoliens avec information dans la base de données « recensement » du projet. En considérant le nombre d'éoliennes, la région Auvergne-Rhône-Alpes fait aussi partie des régions ayant régulé le plus d'éoliennes, avec 61% d'éoliennes régulées.

La carte suivante (Figure 10) représente le pourcentage et le nombre de parcs éoliens régulés par région en prenant en compte les parcs éoliens avec information dans la base de données « Recensement » afin d'obtenir une vision synthétique de la mise en œuvre de cette mesure en fonction du découpage régional en France métropolitaine. La carte en Figure 11 présente le pourcentage et le nombre d'éoliennes régulées en faveur des chiroptères par région, afin de confronter les résultats avec la représentation groupée par parc éolien.

Ces cartes témoignent de disparités régionales dans la mise en œuvre de mesures de régulation des éoliennes en faveur des chiroptères. Sept régions présentent un pourcentage d'éoliennes régulées en faveur des chiroptères sur leur territoire supérieur à 50% : les régions Auvergne-Rhône-Alpes, Centre-Val de Loire, Normandie, Nouvelle-Aquitaine, Occitanie, Pays de la Loire et Provence-Alpes-Côte d'Azur. Quatre régions présentent un pourcentage d'éoliennes régulées en faveur des chiroptères sur leur territoire compris entre 30 et 50% : les régions Bourgogne-Franche-Comté, Bretagne, Grand Est et Île de France. Une région présente un pourcentage d'éoliennes régulées en faveur des chiroptères sur son territoire inférieur à 30%, la région Hauts-de-France, malgré le nombre important de parcs éoliens et d'éoliennes avec information dans la base de données pour cette région (155 parcs et 1094 éoliennes).

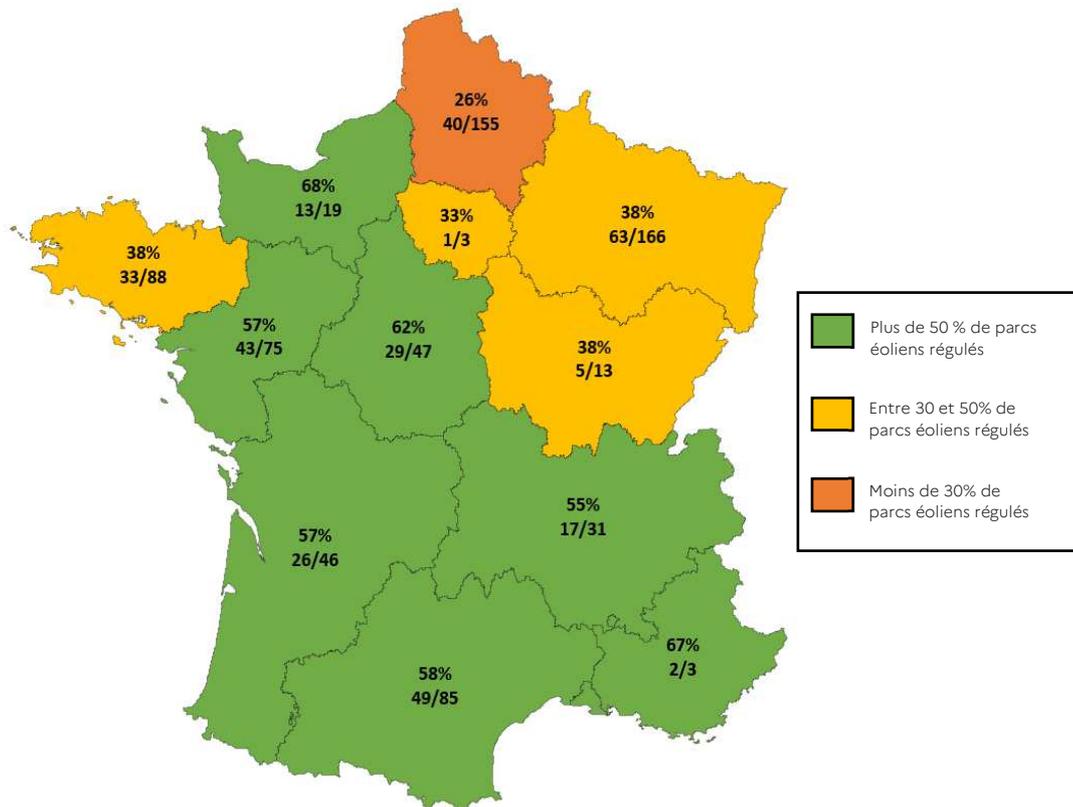


Figure 10 : Nombre et pourcentage de parcs éoliens régulés en faveur des chiroptères, par région de France métropolitaine (uniquement sur le jeu de données des parcs éoliens avec information)

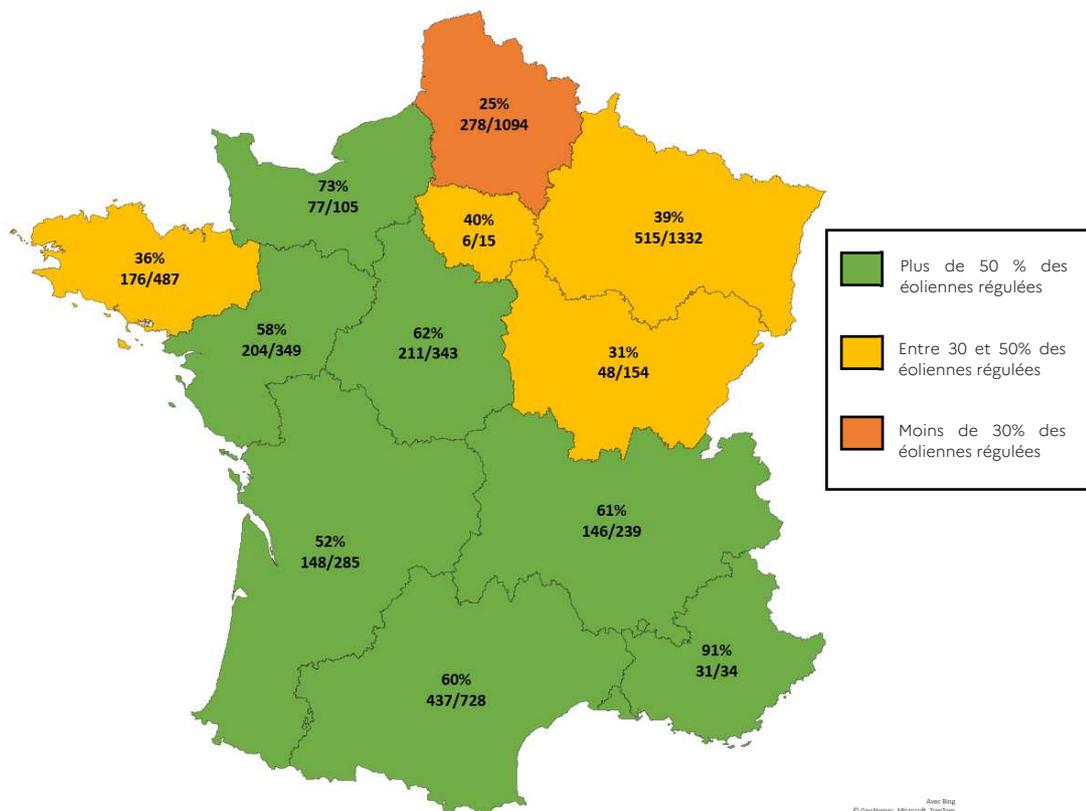


Figure 11 : Nombre et pourcentage d'éoliennes régulées en faveur des chiroptères, par région de France métropolitaine (uniquement sur le jeu de données des éoliennes avec information)

2.2.1.2. Comment la mesure s'est-elle développée dans le temps ?

Afin d'obtenir une vision chronologique de l'adoption de la mesure de régulation à l'échelle nationale, la mise en œuvre d'une première proposition de régulation des éoliennes pour chaque parc éolien a été considérée. Cela prend en compte aussi bien les documents réglementaires (arrêtés préfectoraux / arrêtés préfectoraux complémentaires) que les rapports de bureaux d'études préconisant une régulation pour identifier la première année de proposition de la mesure, avant possibles évolutions ultérieures.

La Figure 12 présente l'évolution temporelle de préconisation de la mesure de régulation des éoliennes en faveur des chiroptères à l'échelle nationale. La courbe pondère cette évolution du nombre de prescriptions de la mesure par l'évolution du nombre de parcs éoliens raccordés chaque année.

Les premières propositions de mesures expérimentales apparaissent dès 2009, mais les prescriptions commenceront réellement à prendre de l'ampleur entre 2013 et 2015, avec une progression qui dépassera celle du nombre de parcs éoliens raccordés. Par la suite, le profil de la courbe de pondération plus stable témoigne d'une progression de la mesure plus proportionnelle à l'évolution du nombre de parcs. Globalement, ces dernières années, la mesure semble donc préconisée régulièrement lors de nouveaux parcs à l'échelle nationale.



Figure 12 : Années de première mise en place d'une mesure de régulation sur les parcs éoliens de France métropolitaine.

Les préconisations de mesures de régulation des éoliennes en faveur des chiroptères peuvent aussi être considérées au regard de l'évolution des principales prescriptions techniques et réglementaires à l'échelle nationale : classement des parcs éoliens en tant qu'Installation Classée pour la Protection de l'Environnement (ICPE) en 2011, premier Protocole de suivi National des parcs éoliens en 2015 et mise à jour du Protocole National en 2018.

La figure suivante (Figure 13) présente le nombre de parcs éoliens pour lesquels une première proposition de régulation est formulée, en fonction de ces différentes périodes d'évolutions techniques et réglementaires. Cette évolution témoigne ici encore d'une augmentation de prescription de la mesure de régulation à l'échelle nationale, qui va de pair avec l'évolution de la réglementation relative aux parcs éoliens et en parallèle de l'augmentation de la taille du parc éolien français (courbe ci-dessous).

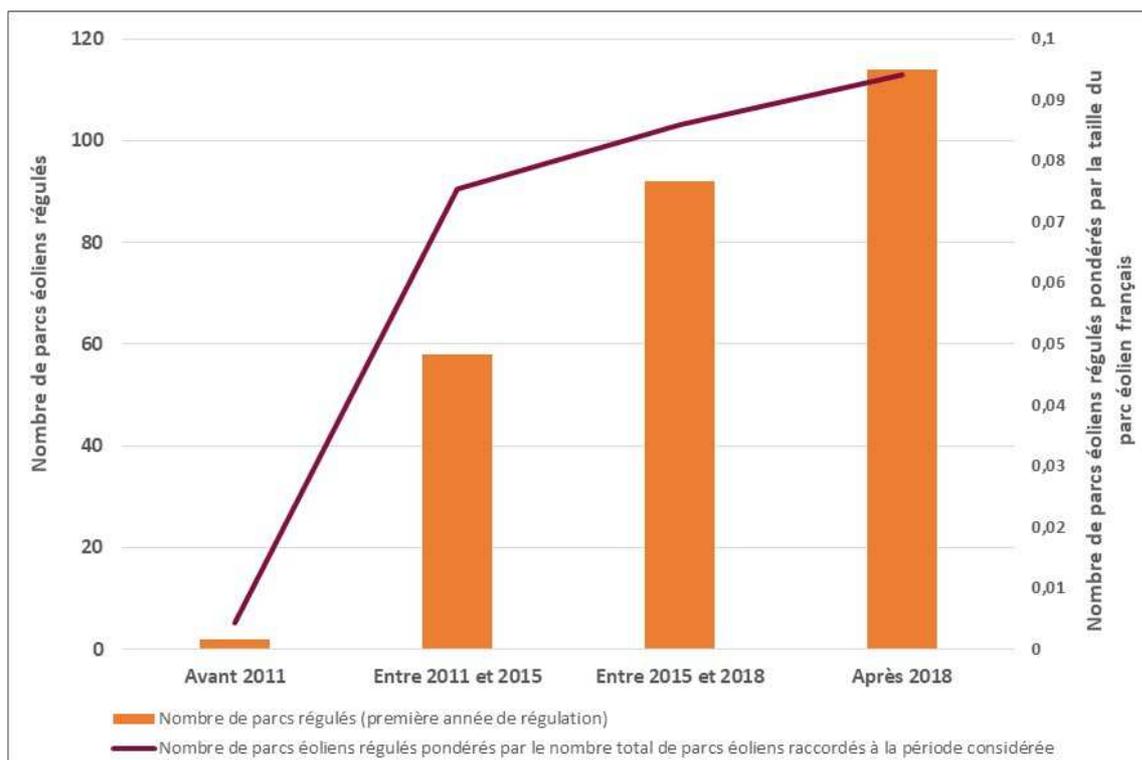


Figure 13 : Années de première mise en place d'une mesure de régulation sur les parcs éoliens de France métropolitaine, catégorisées en fonction de l'évolution de la réglementation relative aux parcs éoliens. (2011 = ICPE ; 2015 : Protocole National ; 2018 : Mise à jour du Protocole National)

2.2.1.3. Quelles sont les perspectives nationales ?

L'analyse précédente fait état du développement de la mesure de régulation sur le parc éolien français à la fin de l'année 2020, ainsi que de sa progression historique en tant que mesure de réduction en faveur des chiroptères. Bien que ces résultats témoignent d'une augmentation progressive des prescriptions de la mesure à l'échelle nationale, ils ne reflètent toutefois pas la dynamique à venir pour les nouveaux projets éoliens.

Dans cette optique, la « BDD Pratiques de la régulation / projets éoliens » a été constituée, en prenant soin de noter les projets pour lesquels une mesure de régulation avait été prescrite.

Le tableau suivant (Tableau 13) présente le nombre de projets analysés (déposés sur la plateforme projets-environnement.gouv.fr au 15 juillet 2021) pour lesquels une mesure de régulation était prévue ou non.

Tableau 13 : Nombre de projets éoliens par région déposés sur la plateforme projets-environnement.gouv.fr au 15 juillet 2021 pour lesquels une mesure de régulation était prévue ou non

Région	Nombre de projets avec régulation prévue	Nombre de projets sans régulation prévue
Auvergne-Rhône-Alpes	1	0
Bourgogne-Franche-Comté	4	2
Bretagne	2	2
Centre Val de Loire	1	2
Grand Est	9	3
Hauts de France	19	8
La Réunion	0	1
Martinique	0	1
Normandie	1	3
Nouvelle-Aquitaine	54	17
Occitanie	4	0
Pays de la Loire	6	0
Total général	101	39

Ainsi, sur les 140 rapports d'étude d'impact analysés, 101 présentent une mesure de régulation de l'activité des éoliennes en faveur des chiroptères, et 39 n'en comportent pas.

La Figure 14 synthétise le nombre de projets éoliens pour lesquels une mesure de régulation était prévue ou non au 15 juillet 2021.

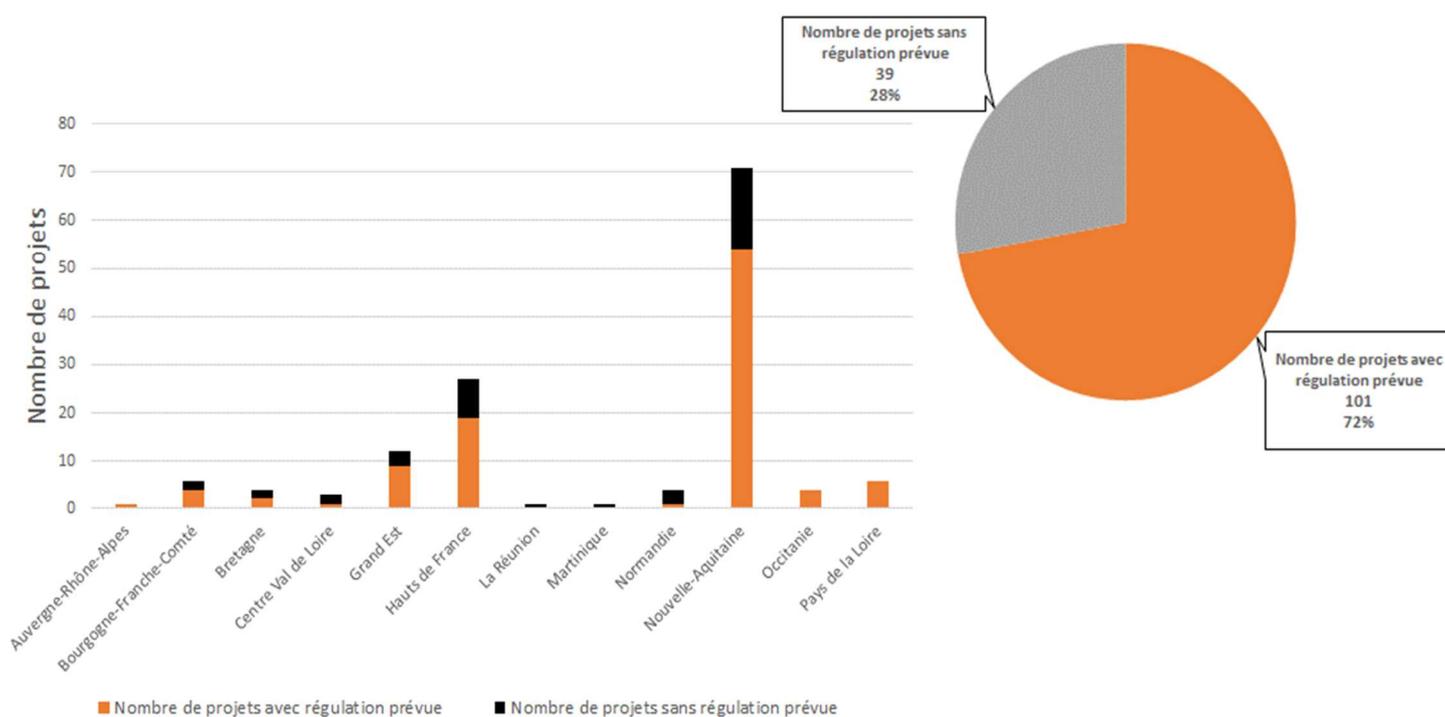


Figure 14 : Nombre de projets avec et sans régulation prévue, à l'échelle nationale et par découpage régional (pour les projets déposés sur la plateforme projets-environnement.gouv.fr au 15 juillet 2021)

Globalement, la mesure de régulation des éoliennes en faveur des chiroptères apparaît aujourd'hui comme très majoritairement proposée à l'échelle nationale. En comparaison du résultat de 44% de parcs éoliens construits régulés à l'échelle nationale, le chiffre prévisionnel de 72% de parcs éoliens régulés semble confirmer la généralisation en cours de cette mesure.

Certaines régions, notamment celles pour lesquelles un grand nombre de projets éoliens sont prévus (Nouvelle-Aquitaine, Grand-Est et Hauts de France), présentent encore une part non négligeable de projets sans mesure de régulation. En effet, près de 30% des dossiers ne comportent pas cette mesure, semblant pourtant essentielle pour réduire l'impact global de l'éolien sur les populations de chiroptères.

Ici encore, ces données sont à considérer avec précaution, les mesures proposées dans l'étude d'impact n'étant pas forcément une version définitive des mesures qui seront mises en place une fois le parc éolien construit. Il est ainsi possible que des mesures de régulation des éoliennes soient rajoutées à posteriori du dépôt de l'étude d'impact, à la suite des nombreuses négociations qui peuvent avoir lieu avec les différentes instances administratives avant l'obtention du permis de construire.

A retenir de cette partie :

La mesure de régulation des éoliennes en faveur des chiroptères est une mesure de réduction des risques d'impact sur les populations de chauves-souris déployée sur un peu moins de la moitié des parcs éoliens construits de France jusqu'en 2020 (44% d'après le recensement effectué). Toutefois, des disparités régionales existent quant à l'adoption de cette mesure, avec une prise en compte qui semble plus tardive dans certaines régions que dans d'autres.

Depuis les premières préconisations historiques (2009 en France), cette mesure est proposée de façon croissante à l'échelle nationale. Suite à une progression importante entre 2013 et 2015 comparée à l'évolution du nombre de parcs raccordés, l'évolution de la mesure semble aujourd'hui plus proportionnelle à la progression du parc éolien Français et donc plus systématique. Les évolutions des protocoles réglementaires en vigueur sont aussi liées à la diffusion de cette mesure.

En ce qui concerne la dynamique à venir pour les nouveaux projets éoliens, près de 72% des études d'impact comportent désormais 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 mesure de régulation en faveur des chiroptères.

2.2.2. Quelles sont les pratiques du processus de régulation des éoliennes en faveur des chauves-souris ?

2.2.2.1. Comment sont exploitées les principales sources de données nécessaires au processus de régulation : étude de l'activité chiroptérologique et suivi des mortalités

2.2.2.1.1. Sources de données utilisées dans le cadre des études d'impacts de nouveaux projets

Dans le cadre des expertises écologiques des études d'impacts sur l'environnement, l'étude de l'activité acoustique des chiroptères est la principale méthode non intrusive permettant de qualifier les enjeux (cortège d'espèces, intensité d'activité, périodes et secteurs d'activité...). Cependant les modes d'étude acoustique peuvent être très variables, du fait de la diversité des protocoles de relevés, de la pression d'échantillonnage, des outils ultrasonores utilisés, de la phase de traitement des données ou encore des variables utilisées.

Dans le cas particulier d'un projet éolien, l'enregistrement ultrasonore passif en hauteur et en continu est le moyen le plus pertinent à ce jour pour quantifier le niveau de risque de mortalité et qualifier les conditions à risque. L'activité des chauves-souris est en effet très hétérogène dans le temps, dans l'espace géographique et dans l'espace altitudinal. Elle varie sensiblement d'un site à l'autre, d'une éolienne à l'autre et entre le pied et le rotor d'une éolienne. Cette activité peut parfois s'exprimer de façon très ponctuelle à hauteur de rotors (ex. phénomènes de pics massifs de pipistrelles, passages ponctuels de noctules en transit) ou de façon plus récurrente à des niveaux d'intensité très variés.

Or une partie des espèces volant en altitude ne peut pas être détectée à plus de quelques dizaines de mètres (famille des pipistrelles notamment). Et tous les enregistreurs ultrasonores présentent aussi des limites qui leurs sont propres (sensibilité, paramétrage, opérationnalité, capacité de distinction de faux positifs...) ce qui fait que l'activité enregistrée n'est toujours qu'une perception partielle de la réalité de fréquentation du rotor et de son entourage par les chauves-souris. Sans compter qu'au-delà des limites de perception de l'activité acoustique des chauves-souris, l'activité acoustique elle-même peut aussi induire une perception « déformée » l'activité de vol (ex. surintensité acoustique des séquences de chasse, sous intensité acoustique de comportements de transits en plein ciel...).

Au vu de cette activité hétéroclite et de ces contraintes de suivis, lorsqu'une étude acoustique est réalisée, seul un suivi automatisé à hauteur de rotor tout au long de la période d'activité des chauves-souris (sans échantillonnage temporel du suivi) peut permettre de mettre en évidence ces phénomènes de façon aussi fine et représentative que possible. Mais s'il s'agit d'une perception partielle de la réalité, la masse de données récoltées permet de limiter les biais évoqués plus hauts et de donner une perception assez fiable de la diversité des situations comportementales sur le site si ces dernières sont récurrentes.

La corrélation entre l'activité acoustique des chauves-souris en hauteur et la mortalité générée par les éoliennes a pu être démontrée (Roemer et al. 2017). Dès lors, le suivi d'activité acoustique en continu et à hauteur de rotor vise à caractériser le **niveau d'exposition au risque de mortalité** des chauves-souris sur un site, en fonction des espèces en présence, des périodes d'activités, des comportements, des phénologies... Cette perception du niveau d'exposition au risque doit aider à la prise de **décision d'engager ou non une mesure de régulation**. Par ailleurs, en croisant les données avec les données climatiques (vitesse de vent, température...), ce suivi d'activité en hauteur permet aussi et surtout de **caractériser précisément les conditions à risque**, données essentielles pour dimensionner une mesure de régulation proportionnée au contexte local. Le suivi d'activité des chiroptères en hauteur apparaît donc finalement comme **le principal moyen pour prendre la décision et pour dimensionner correctement la mesure de régulation**.

➤ Evolution temporelle

Si l'intérêt de disposer d'un suivi acoustique passif en plein ciel est avéré depuis une dizaine d'années dans le cadre de projets éoliens, dans la pratique, pour l'échantillon d'études d'impacts analysées (N=141), les graphiques suivants (Figure 15) témoignent d'un engagement relativement récent.

Ne serait-ce que sur l'évolution des relevés en hauteur (sans tenir compte du caractère continu ou échantillonné du suivi), ce n'est qu'à partir de 2017 que plus de la moitié des projets semble bénéficier de ce type de suivi. Pour les autres projets, la prévision de l'impact sur les chauves-souris reste limitée à des relevés acoustiques depuis le sol qui ne traduisent donc pas la situation de plein ciel. Autrement dit, **seule une partie des projets éoliens les plus récents est susceptible de disposer d'une approche pertinente des conditions de risques chiroptérologiques à hauteur de rotor pour une prise de décision et un dimensionnement argumenté de la mesure de régulation** (mode prédictif). Les autres ne peuvent donc théoriquement envisager la mesure de régulation qu'à l'aveugle, sur un mode préventif / conventionnel, avec les contraintes qui y sont liées (cf. Tableau 1 page 26).

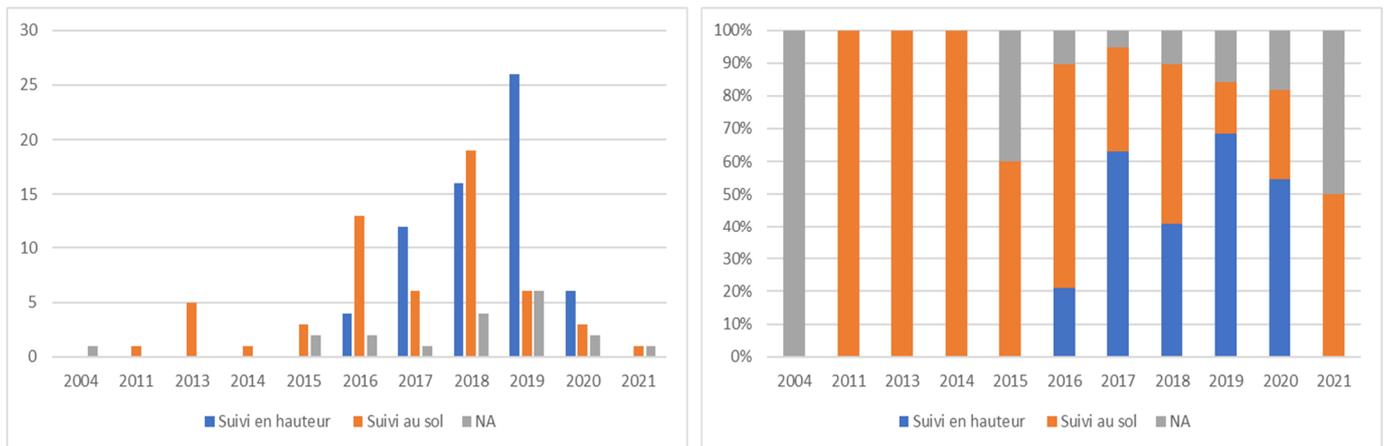


Figure 15 : Evolution de la proportion des suivis bioacoustiques des chauves-souris en hauteur dans les études d'impacts de projets éoliens
(En nombre d'études de l'échantillon à gauche, en pourcentage à droite)

Rappelons que les **prescriptions nationales en termes de suivis ultrasonores en hauteur sont encore peu incitatives** (cf. chapitre 1.3.5 page 17). Depuis sa version de 2010, le Guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens (MEEDDM 2010) incite en effet au développement de ces enregistrements automatisés en hauteurs pour caractériser l'état initial, mais surtout pour les sites jugés les plus sensibles (projets en forêt, p. 75). 10 ans plus tard, la version révisée de ce guide national (MTE 2020) continue de cibler sa mise en œuvre surtout sur les projets en forêt ou les sites à enjeux forts (p. 107).

Autrement dit, tant que cette mesure n'est pas généralisée à l'ensemble des projets, seuls les sites supposés à enjeux forts sont sensés bénéficier d'une réelle démarche de dimensionnement d'une mesure de régulation prédictive. Or vu les limites d'étude des chiroptères rappelées plus haut, comment juger du niveau d'enjeu préalable si on ne dispose pas de suivi en hauteur à l'état initial ? Certains parcs éoliens situés dans des secteurs jugés à priori peu sensibles à l'état initial (ex. plaines agricoles intensives) peuvent en effet s'avérer très mortifères en phase d'exploitation, alors que d'autres parfois situés en forêt ne le sont pas autant qu'on pouvait le supposer en amont. Cela témoigne des limites de l'anticipation des risques éoliens pour les chauves-souris par une approche des habitats ou de l'activité mesurée au sol, des préjugés sur les liens qui peuvent exister entre l'activité au sol et en hauteur et plus généralement sur les lacunes de connaissances rémanentes sur l'aéro-écologie des chiroptères.

➤ Disparités régionales

Sur le plan géographique, l'histogramme qui suit (Figure 16) ne témoigne pas de disparité régionale évidente sur cette question de la proportion d'études d'impacts qui bénéficient ou non d'un suivi d'activité acoustique en hauteur.

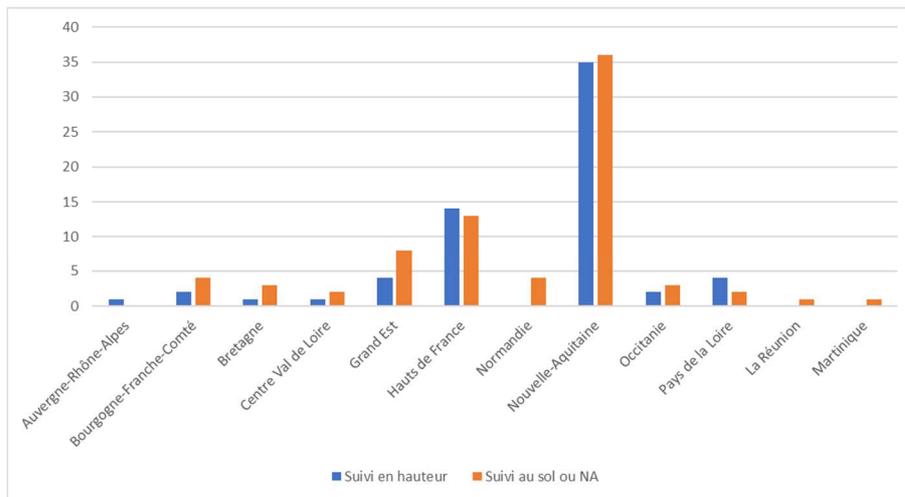


Figure 16 : Proportion régionale des suivis en hauteur dans l'échantillon de rapports d'études d'impacts de projets éoliens

2.2.2.1.2. Sources de données dans le cadre des suivis d'impacts des parcs en activité

Au sein de l'échantillon de rapports de suivis d'impacts analysés (N=559), les principales données de base utilisées dans le processus de conception, dimensionnement ou optimisation de la mesure de régulation proviennent surtout des résultats de **suivis passifs de l'activité chiroptérologique en hauteur**, mais aussi des **suivis de la mortalité**.

Les deux types de suivis ne sont pas toujours engagés en parallèle. Le graphique suivant (Figure 17) montre que la grande majorité des rapports (91%, N=497) se base au moins sur les données d'un suivi de la mortalité, alors que seuls 33% (N=180) tiennent compte de données de suivis acoustiques en hauteur.

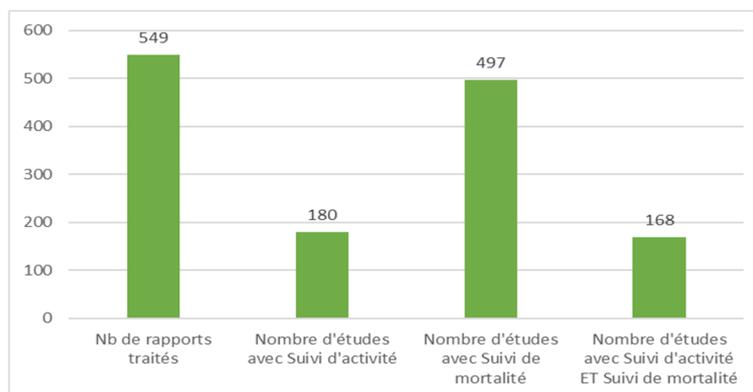


Figure 17 Histogramme des principales sources de données exploitées pour dimensionner la mesure (N=559)

L'absence de suivi d'activité passif en hauteur peut s'expliquer par :

- les parcs éoliens pour lesquels les études d'impact initiales (N=22) n'avaient pas bénéficié de suivis acoustiques en continu en hauteur. Dans ce cas, la mesure est généralement dimensionnée de façon conventionnelle (mesure préventive). Parfois, les choix de dimensionnement sont justifiés sur la base d'un suivi chiroptérologique au sol (échantillon de visites au détecteur à ultrasons, ou pose d'enregistreurs passifs sur quelques nuits, semaines...).
- les cas de suivis d'impacts de parcs éoliens en activité, mais pour lesquels aucun suivi d'activité en hauteur n'a été engagé (N=98). Dans ce cas, soit seules les données de suivis de la mortalité sont exploitées pour traiter la question de la nécessité ou du dimensionnement de la mesure de régulation, soit le suivi intègre aussi un suivi acoustique au sol.

Les études qui se basent à la fois sur les résultats de suivi d'activité en hauteur couplés aux résultats de mortalités ne représentent que 30,6% de l'échantillon (N=168).

➤ Evolution temporelle

Sur une approche temporelle, pour les parcs éoliens en activité, les suivis d'activité en hauteur sont régulièrement moins exploités que le suivis de la mortalité comme source de données du processus de régulation. Mais ces lacunes ont été largement comblées suite à la publication du protocole de suivi environnemental 2018. Depuis, le suivi de l'activité en hauteur représente 76% des rapports traités (

Figure 18). Cela témoigne du fort **effet positif de l'évolution des prescriptions nationales pour améliorer les pratiques.**

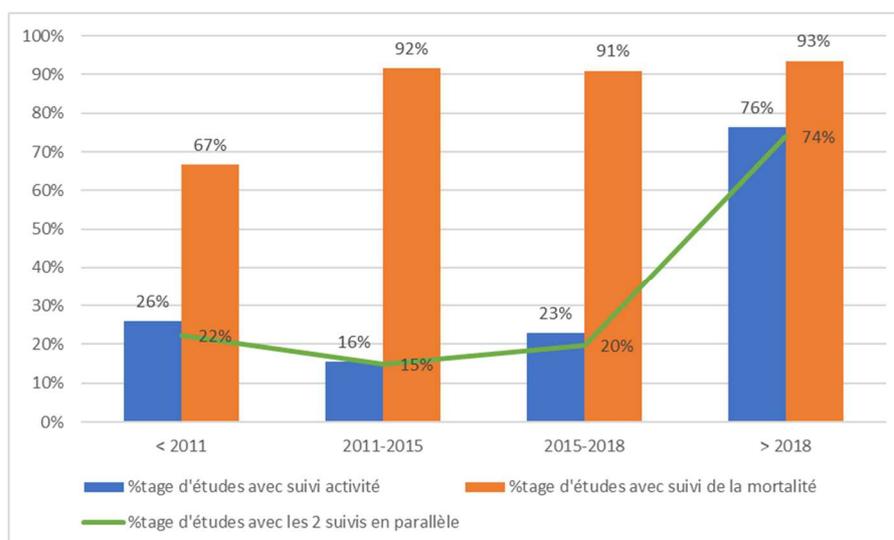


Figure 18 Histogramme de l'évolution temporelle des principales sources de données du processus de régulation

➤ Disparités régionales

La répartition régionale du nombre d'études qui comprend un suivi de la mortalité semble assez cohérente avec la répartition globale de l'échantillon de données (cf. graphique de la page 34). On retrouve en effet le plus d'études concernées par le suivi de mortalité dans les principales régions représentées par l'échantillon (Grand-est, Bretagne, Occitanie).

En revanche, cette répartition géographique diverge pour ce qui concerne le suivi d'activité en hauteur (Figure 19) où l'Occitanie est la région la plus représentée, suivie de la Bretagne. Cela témoigne d'un engagement plus fort ou plus précoce de l'Occitanie dans cette démarche par rapport aux autres régions.

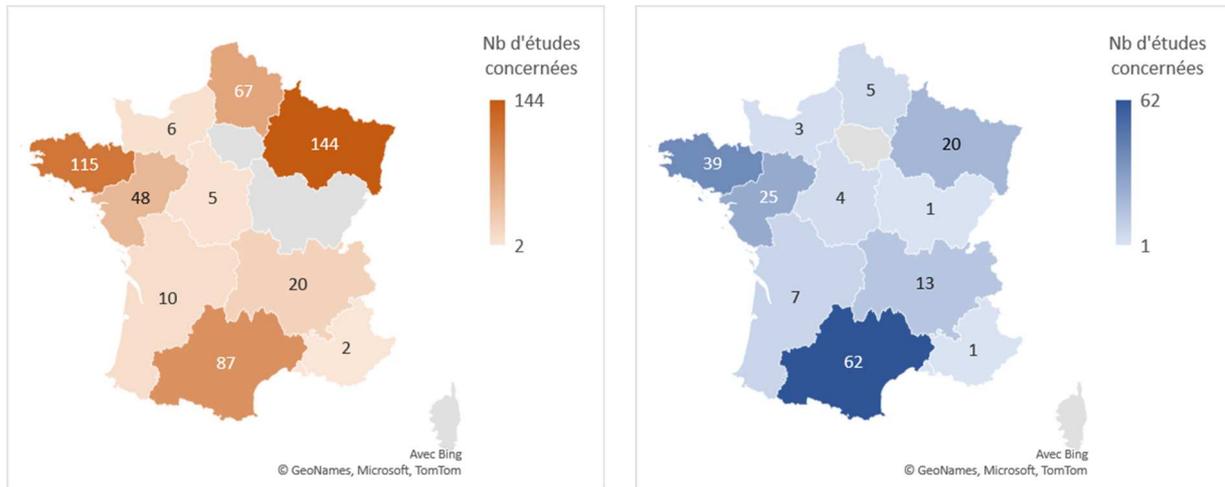


Figure 19 Disparités régionales des suivis de la mortalité (gauche) et des suivis de l'activité en hauteur (droite) au sein de l'échantillon d'études

A retenir de cette partie

Dans le cadre de projets éoliens ou des parcs en exploitation, le suivi passif et en hauteur de l'activité des chauves-souris de l'étude d'impact est le meilleur moyen pour estimer le niveau de risque et pour qualifier les conditions à risques de mortalité des chauves-souris. Cette approche acoustique est toutefois soumise à une diversité de biais (portée d'écholocation, activité acoustique liée aux comportements, matériels...) qui peuvent affecter la juste représentation de l'activité. Ces biais sont tempérés par le cumul de données recueillies sur le long terme et la récurrence des comportements. C'est donc une source de données essentielle à analyser en détail pour prendre objectivement la décision de réguler et pour dimensionner la mesure de régulation de façon proportionnée et argumentée.

Dans le cadre des parcs en activité, le suivi de la mortalité permet de qualifier l'impact par mortalité, mais contribue mal (partiellement) à la qualification des conditions de risques. Bénéficier alors d'une analyse croisée des deux sources de données est l'idéal pour le processus de régulation.

Dans la pratique, le **suivi passif et en hauteur de l'activité des chauves-souris s'est développé récemment en France**. 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. Seuls les parcs les plus récents peuvent bénéficier de cet apport.

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 de suivi environnemental. Compte tenu de ce développement récent, seul 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.

2.2.2.2. Comment est mise en œuvre l'étude de l'activité des chauves-souris en hauteur vers le processus de régulation ?

2.2.2.2.1. Etude de l'activité en hauteur dans le cadre de l'étude d'impact de nouveaux projets

➤ Généralités sur les contraintes techniques et logistiques du support d'étude de l'activité des chauves-souris

Techniquement, la mise en œuvre d'un suivi acoustique en hauteur dans le cadre d'un nouveau projet pose la question du support des outils ultrasonores. L'utilisation d'un **mât de mesure de vent** présent sur la zone d'implantation potentielle du projet permet idéalement à la fois de répondre à la nécessité d'un suivi en continu (sans échantillonnage au cours de la période d'activité des chauves-souris) et de positionner les micros à hauteur de rotor, c'est-à-dire de la zone à risque du projet (selon le gabarit des éoliennes projetées).

Cependant la mise à disposition d'un mât de mesure de vent n'est pas toujours envisagée par le porteur de projet ou techniquement possible (coûts, autorisation administrative préalable, logistique, délais de mise à disposition, dégradations des équipements etc...). A défaut, d'autres supports peuvent être exploités tels que les arbres avec des micros positionnés au-dessus de la canopée (pour s'affranchir des obstacles acoustiques liés au feuillage), ou les lisières forestières, ou encore les ballons à hélium... Cependant toutes ces alternatives ne permettent pas de répondre aux contraintes d'un suivi à la fois en hauteur ET en continu.

L'utilisation de **ballons à hélium** ne peut en effet techniquement pas être envisagée sur le long terme et pour toutes les conditions climatiques et induit forcément un échantillonnage temporel du suivi.

La mise en place **d'enregistreurs autonomes au niveau des arbres** (au-dessus de la canopée ou en lisières) peut permettre de répondre à la nécessité du suivi passif sur plusieurs mois d'affilée, mais pas à celle d'une mesure de l'activité de plein ciel. Au mieux, l'activité de plein ciel des espèces à longue portée d'émission pourra être détectée à ce niveau (ex. noctules), mais pas celle des pipistrelles qui prennent de l'altitude au-delà de 30-40 m de la position des enregistreurs (Barataud 2015). Sans compter que les enregistrements ne permettront alors pas de distinguer l'activité de plein ciel de celle plus proche de la canopée ou du sol et donc d'identifier les conditions de vols du cortège d'espèces en hauteur (conditions à risques).

Dans le cadre d'un projet de renouvellement d'un parc existant voire d'une extension, l'utilisation des **nacelles d'éoliennes déjà en place** apparaît comme une solution intéressante dès lors que l'éolienne en question se situe proche et dans un contexte comparable de la zone d'extension ou de repowering. Non seulement cela permet la mise en œuvre des modes de suivis passifs (en continu), mais ça offre aussi l'avantage de tenir compte des éventuels effets d'attractivité, voire d'aversion des chauves-souris par les éoliennes. Il n'est pas exclu que le choix du support d'enregistrement en plein ciel entre un mât de mesure de vent et une nacelle d'éolienne influence donc au moins partiellement les résultats, même si cette hypothèse n'est pas encore documentée à notre connaissance et reste difficile à démontrer.

D'autres modes de suivis de l'activité en hauteur des chauves-souris tels que le suivi en continu par images infrarouges ou thermiques ne sont pas pris en compte ici, faute de retour d'expérience à valoriser. En théorie, selon le dispositif et ses limites, ce type de données pourrait cependant permettre une perception d'activité en hauteur et en continu.

➤ **Pratiques sur le support de l'étude d'activité et incidences sur le mode de régulation retenu**

Parmi l'échantillon de rapports d'études d'impact qui présentent d'une expertise bioacoustique et qui précisent le mode de suivi acoustique utilisé (N=122) ;

- Environ la moitié n'ont bénéficié ni d'un suivi en hauteur, ni d'un suivi en continu. Les expertises chiroptérologiques se sont alors appuyées sur des passages ponctuels de chiroptérologues via des points d'écoute et des transects au détecteur à ultrason, voire l'utilisation d'enregistreurs passifs, mais à l'échelle d'une ou de quelques nuits.
- 20% ont bénéficié soit d'un suivi en hauteur mais pas en continu (ex. ballons à hélium, enregistreur passif sur mats pour un échantillon de quelques nuits / semaines...), soit d'un suivi en continu, mais pas en hauteur (ex. enregistreurs autonomes sur canopée ou lisières).
- Et donc **seules 30% des études ont bénéficié d'un suivi en hauteur et en continu** (depuis un mât de mesure de vent ou une nacelle d'éolienne sur la plupart des mois d'activité des chauves-souris).

La Figure 20 montre que le mode de suivi acoustique engagé au niveau de l'étude d'impact conditionne le mode de régulation proposé comme mesure. Ainsi, le mode de régulation prédictif le plus directement proportionné à la perception des risques du site est surtout proposé lorsque les études bénéficient d'un suivi en hauteur et en continu. A défaut, c'est surtout un mode de régulation préventif qui est retenu puisque le pattern de régulation ne peut pas objectivement être calqué sur la perception des risques du site à hauteur de rotor. Il est intéressant aussi de constater que **l'absence de prescription de régulation intervient clairement lorsque l'étude d'impact ne bénéficie ni d'un suivi en hauteur ni d'un suivi en continu**. Autrement dit, en phase d'étude d'impact, l'absence de perception des conditions de risques d'impacts en hauteur induit beaucoup plus souvent l'absence de prescription de mesure de régulation, contrairement aux cas où cette perception est obtenue. On aurait pu s'attendre au contraire à ce que ce défaut de perception entraîne plus systématiquement des mesures préventives. Cela **renforce l'intérêt d'un suivi en hauteur et en continu vers la recherche raisonnée d'une mesure proportionnée à la situation du site**.

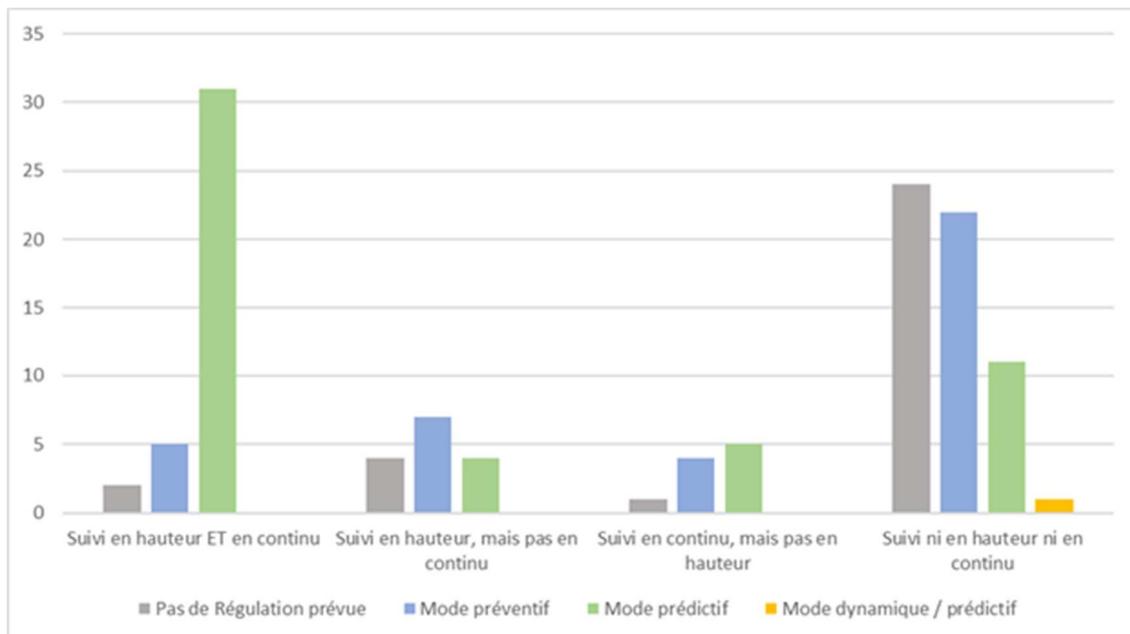


Figure 20 Mode de régulation engagé selon le type de suivi acoustique utilisé dans le cadre des études d'impact d'un nouveau projet

Plus que le critère de hauteur, il semblerait que ce soit surtout le caractère continu du suivi qui permette de faire prendre la décision d'une mesure de régulation dans les études (Figure 21). Parmi l'échantillon d'études d'impacts analysées, les cas d'échantillonnages temporels correspondent surtout à l'utilisation des ballons sonde (environ 70%). Alors que les suivis en continu sont majoritairement réalisés à partir de mâts de mesures de vent (environ 80%).

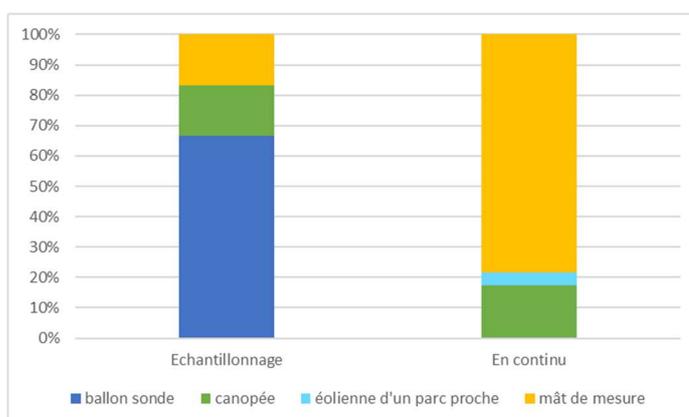


Figure 21 Proportion des supports de suivis acoustiques exploités dans le cadre des études d'impacts pour des suivis réalisés en continu ou non

2.2.2.2. Etude de l'activité en hauteur dans le cadre des suivis d'impact de parcs exploités

➤ Intérêt de l'étude d'activité en hauteur dans le cadre d'un suivi environnemental

Dans le cadre du suivi environnemental d'un parc en activité, ou dans le cadre d'un projet de renouvellement de parc, les résultats du suivi de mortalité permettent une perception de l'impact généré par une analyse typologique des mortalités au sol (nombre de mortalités brutes, cortèges d'espèces, périodes, éoliennes concernées, estimation des taux de mortalités...). A ce titre, sous réserve de tenir compte des biais inhérents à ce type de suivis, le **constat du niveau d'impact par mortalité généré par le parc éolien permet au moins d'argumenter la décision d'engager ou non une mesure de régulation.**

Mais ces relevés de mortalités *a posteriori* ne permettent pas de percevoir précisément quand les mortalités sont intervenues, et par conséquent dans quelles conditions climatiques elles se sont produites. Ils ne peuvent donc pas contribuer à la définition d'un pattern de régulation proportionné au site (prédictif) ou alors partiellement (uniquement pour le paramètre saisonnier, voire le choix des éoliennes les plus à risques si la mesure n'est pas engagée pour toutes les éoliennes).

Enfin, dans le cadre des suivis d'impacts d'un parc en activité comme dans le cadre des études d'impacts de projets éoliens, seul le suivi de l'activité chiroptérologique en hauteur peut servir de référence au dimensionnement d'une mesure proportionnée au site.

➤ Prescriptions nationales sur les méthodes de mise en œuvre

Sur la base des éléments précédents, la version 2018 du Protocole de suivi environnemental en vigueur à ce jour prescrit clairement la mise en œuvre de ce suivi en hauteur, de façon couplée au suivi de la mortalité. Le cadre méthodologique à respecter pour sa mise en œuvre est ainsi prescrit comme suit :

- **suivi acoustique à hauteur de nacelle en continu**, c'est-à-dire sans échantillonnage temporel, toutes les nuits,
- **de 1 h avant le coucher de soleil jusqu'à 1 h après le lever de soleil**,
- **au minimum entre les semaines 31 à 43** (août-octobre), mais aussi pour les semaines 20 à 30 (mi-mai à juillet) si l'étude d'impact n'a pas fait l'objet d'un suivi en hauteur, ou sur une plage encore plus large si des enjeux particuliers sont supposés,

- à l'aide d'outils qui couvrent la diversité des caractéristiques acoustiques des espèces,
- à l'aide de micros omnidirectionnels orientés vers la base du rotor, supposée la plus à risque,
- à l'aide de micros recalibrés chaque année,
- avec une bonne qualité d'enregistrement (en maîtrisant les parasites acoustiques),
- et sur la base d'au moins un point d'écoute pour 8 éoliennes, selon l'homogénéité du contexte environnant du parc éolien.

Pour ce qui concerne le traitement des données acoustiques, le protocole précise aussi que « [...] l'analyse doit valoriser finement l'ensemble des données brutes et informations qui y sont associées (cris sociaux, buzz de chasse, groupes d'individus...). [...] ». Cela sous-entend que **tout échantillonnage est proscrit, que ce soit au niveau de la phase de détermination des espèces** (analyse manuelle de l'ensemble des contacts enregistrés) **ou de la présentation des résultats** (ex. « minute positive »).

Pour ce qui concerne la version 2015 du protocole de suivi environnemental (MEDDE novembre 2015), le suivi de l'activité des chiroptères était déjà prescrit., mais par « [...] des mesures au sol qui pourront être complétées selon la sensibilité des espèces détectées par des mesures en hauteurs [...] » (p. 14). Autrement dit, c'est selon la « vulnérabilité » des espèces détectées généralement depuis le sol en phase d'étude d'impact que devait être envisagée ou non une mesure de suivi en hauteur. Cette recommandation ne tient pas compte de fait des biais de détection au sol des espèces sensibles volant parfois en altitude et à faible portée d'écholocation (ex. pipistrelles).

➤ Pratiques nationales

✓ A propos du support de suivi acoustique utilisé

- Au sein de l'échantillon de rapports de suivis d'impacts étudiés (559), et parmi les 180 qui bénéficient d'un suivi d'activité en hauteur et en continu, **le type de support utilisé est très majoritairement une nacelle d'éolienne** (

Figure 22). Ce constat ne date pas que de la dernière révision 2018 du protocole de suivi environnemental. C'était déjà le cas sous le régime de la version 2015 mais même aussi auparavant. Autrement dit, pour les 30% des cas où un suivi en hauteur a été engagé parmi les rapports de suivi environnementaux analysés, les pratiques de suivi en hauteur en nacelles d'éoliennes ont plutôt précédé l'évolution des prescriptions nationales. Depuis 2018, le graphique montre que la nacelle d'éolienne est désormais quasiment l'unique support de suivi utilisé. C'est positif compte tenu des éventuels effets d'attractivité voire d'aversion de l'éolienne vis-à-vis des chiroptères.

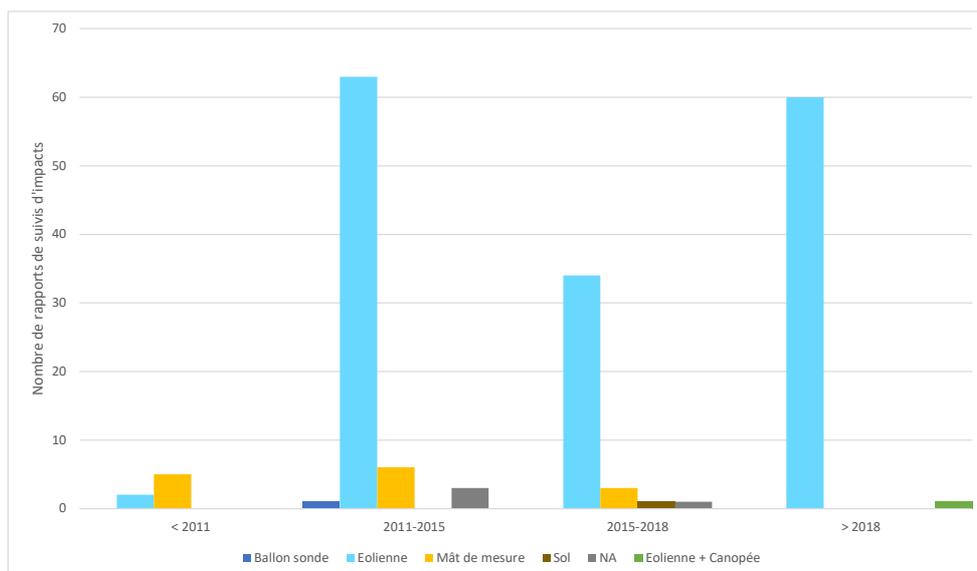


Figure 22 Evolution des supports de suivis acoustiques en hauteur utilisés dans le cadre des suivis d'impacts

✓ A propos du type d'enregistreur acoustique utilisé

Pour les 180 rapports de suivi d'impact qui présentent un suivi en hauteur, pas moins de 18 modèles d'enregistreurs ont été utilisés, seuls, ou parfois en combinaison sur le même parc, au cours de la même campagne. Les différentes marques de matériel proposent en effet souvent plusieurs modèles, avec l'évolution de la technologie (ex. BATmode S / BATmode S+ / BATmode S2+, Batcorder / GSM-Batcorder, SM2 / SM2Bat+ / SM3Bat / SM3Bat+ / SM4Bat, etc...). Les graphiques suivant se limitent à une analyse par marques.

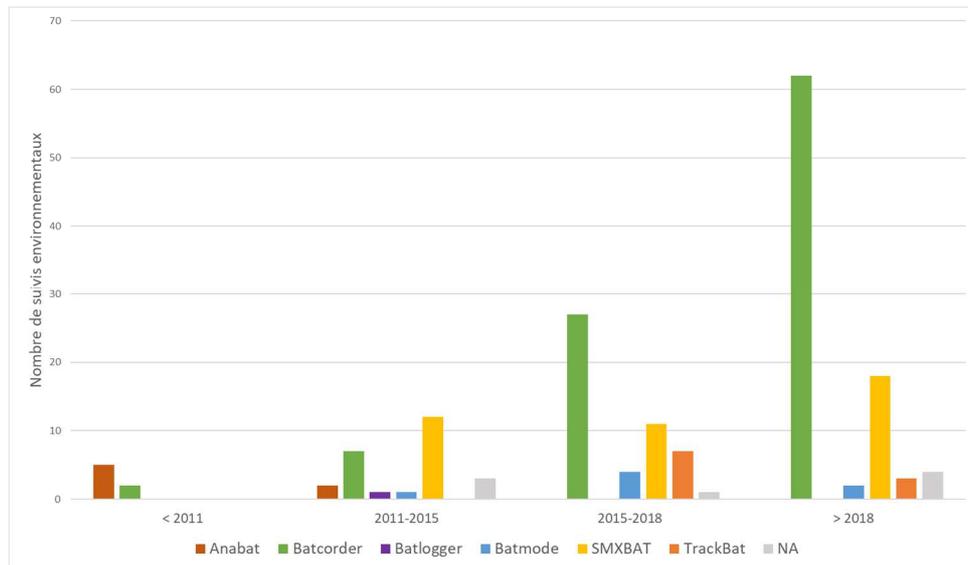


Figure 23 Evolution des matériels de suivis acoustiques en hauteur utilisés dans le cadre des suivis d'impacts

De façon générale, le choix du **modèle d'enregistreur acoustique utilisé en nacelle d'éolienne est assez dépendant de l'organisme en charge de l'expertise**. Chaque organisme fait généralement le choix d'un ou quelques modèles de matériels privilégiés pour le suivi en hauteur en fonction de son expérience, de ses propres perceptions des contraintes et avantages techniques, logistiques ou financières du matériel, et de ses objectifs d'utilisation. Au vu des nombreuses contraintes techniques et logistiques des suivis acoustiques depuis les éoliennes, et du nombre très important de données à traiter via des suivis en continu sur le long terme, le choix d'un matériel acoustique induit généralement une spécialisation plus ou moins marquée de son utilisation. Il faut en effet du temps pour permettre la prise d'habitudes de travail aussi bien pour l'installation, le paramétrage et la maintenance des outils en éolienne, que pour la phase d'acquisition et de traitement des données, l'utilisation de suites de logiciels avec souvent des investissements associés (système d'exploitation informatique propre, système de gestion et sauvegarde des données, formations / habilitations / sous-traitance de techniciens intervenants en éolienne).

Au sein de la base de données « BDD pratiques de la régulation / parcs exploités », les expertises de suivi en nacelles d'éoliennes sont menées par les **74 organismes qui sont à l'origine des 559 rapports de suivis d'impacts** (cf. Figure 7 page 35). **Seuls 31 d'entre eux ont pris en charge ce volet de suivi acoustique en hauteur**. Si on compare toutefois le nombre moyen de rapports par organismes, il est de 7,5 pour l'ensemble des rapports de suivis environnementaux (559 rapports, 74 organismes) et il est de 5,8 pour les volets de suivis en hauteur (180 expertises, 31 organismes). Cela témoigne d'une **répartition assez comparable des expertises entre les organismes à l'échelle nationale**.

Pour l'échantillon de données, ce sont les Batcorders qui sont les plus représentés dans les suivis d'impacts et de plus en plus au fil du temps (Figure 23). Cela s'explique par une représentation plus marquée, dans la base de données, de rapports issus de bureaux d'étude qui se sont spécialisés dans les expertises acoustiques en altitude, et qui ont fait le choix de l'utilisation de ce matériel (Exen, Ouest'Am, O-geo, Althis, Kjm Conseil Environnement, etc...). Il a déjà été évoqué notamment que les rapports d'Exen avaient été logiquement plus facilement mobilisés que les autres pour OPRECh (Occitanie). Mais cela s'explique aussi par une coévolution précurseur de cet outil vers une utilisation spécifique en nacelles d'éoliennes (Allemagne), en lien avec l'important programme de recherche Renebat allemand (Behr et al. 2015). L'outil a alors été utilisé pour développer l'outil Probat vers un dimensionnement automatisé et standardisé de la régulation. Moins spécialisés en éolien, les enregistreurs Sound Meter (SMx) sont pourtant aussi assez fréquemment utilisés depuis le développement de méthodes de suivi en nacelle d'éoliennes, avec de nouvelles versions régulièrement mises à jour. Les autres marques sont moins fréquemment utilisées depuis une dizaine d'années (ex. Batmode, Batlogger, etc...) probablement du fait de leur développement plus récent, et de l'inertie évoquée précédemment pour les chiroptérologues à prendre en main de nouveaux outils. Mais plus

récents, ils présentent aussi des niveaux de spécialisation marqués en éolien dont on suppose qu'ils pourraient faciliter leur développement à terme. L'Anabat est l'un des premiers enregistreurs ultrasonores autonomes disponible sur le marché, mais qui a progressivement été abandonné. Le Trackbat est un outil acoustique destiné à une régulation dynamique. Il n'est donc exploité que par Sense Of Life, l'organisme constructeur, dans les études.

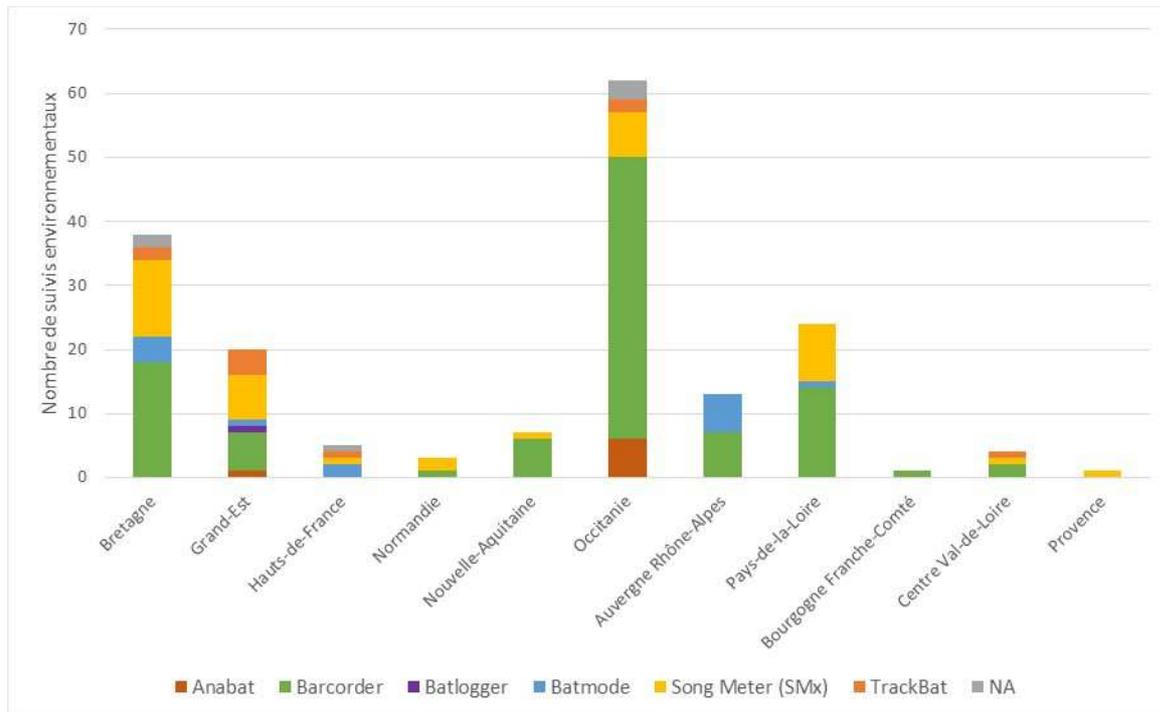


Figure 24 Répartition régionale des matériels de suivis acoustiques en hauteur utilisés dans le cadre des suivis d'impacts

De façon générale, au vu des nombreuses contraintes logistiques et acoustiques pour réaliser des suivis ultrasonores en continu depuis une nacelle d'éolienne, l'évolution technologique en constante progression des outils spécialisés en éolien s'oriente notamment vers ;

- **sur le plan logistique**, pour garantir le caractère continu du suivi, plus de facilité de mise en œuvre, de fiabilité, d'autonomie et d'opérationnalité, de possibilités de suivis quotidiens à distance, de reparamétrages à distance, voire de récupération des données acoustiques à distance.
- **sur le plan des enregistrements acoustiques**, le meilleur compromis entre la détectabilité des cris de chauves-souris (sensibilité) et la gestion des parasites acoustiques (principalement mécaniques et électromagnétiques en nacelle d'éoliennes),
- **sur le plan des analyses acoustiques**, vers des applications de plus en plus adaptées au traitement de volumes importants de données, avec tris automatisés, pré-traitements sur la base de référentiels de sons de plus en plus fournis et facilité d'organisation pour les analyses manuelles.

Parmi l'ensemble des outils listés précédemment, tous sont présentés comme bénéficiant de micro-omnidirectionnels tel qu'exigé par le protocole de suivi environnemental en vigueur (2018).

Quant aux qualités et limites logistiques et acoustiques pour répondre aux autres exigences du protocole de suivi environnemental, chaque matériel présente des avantages et des contraintes qui lui sont propres.

Sur le plan logistique, les versions les plus spécialisées en éolien des Batcorder, Batlogger, Batmode... , présentent l'avantage de fiabilité d'opérationnalité, d'autonomie, de qualité de continuité des enregistrements et de suivi et récupération de données à distance vers un recueil de qualité en continu (sans échantillonnage). Cependant ces outils nécessitent généralement l'intervention des chiroptérologues en nacelles pour l'installation, le paramétrage et la maintenance, ce qui implique des contraintes logistiques d'accès et de sécurité. Les SongMeter (SMx) présentent l'avantage de micros déportés qui peuvent éventuellement être positionnés par des techniciens de maintenance en nacelle (boîtier à la base du mât) limitant le besoin d'intervention en nacelle. Mais la longueur des câbles les expose aux parasites

électromagnétiques générés par l'éolienne. Ces câbles doivent alors être blindés (ferrite) pour réduire les interférences (cf. User Guide Wildlife Acoustics).

Sur le plan acoustique, la plupart d'entre eux font l'objets de tests et analyses comparatives (Figure 25).

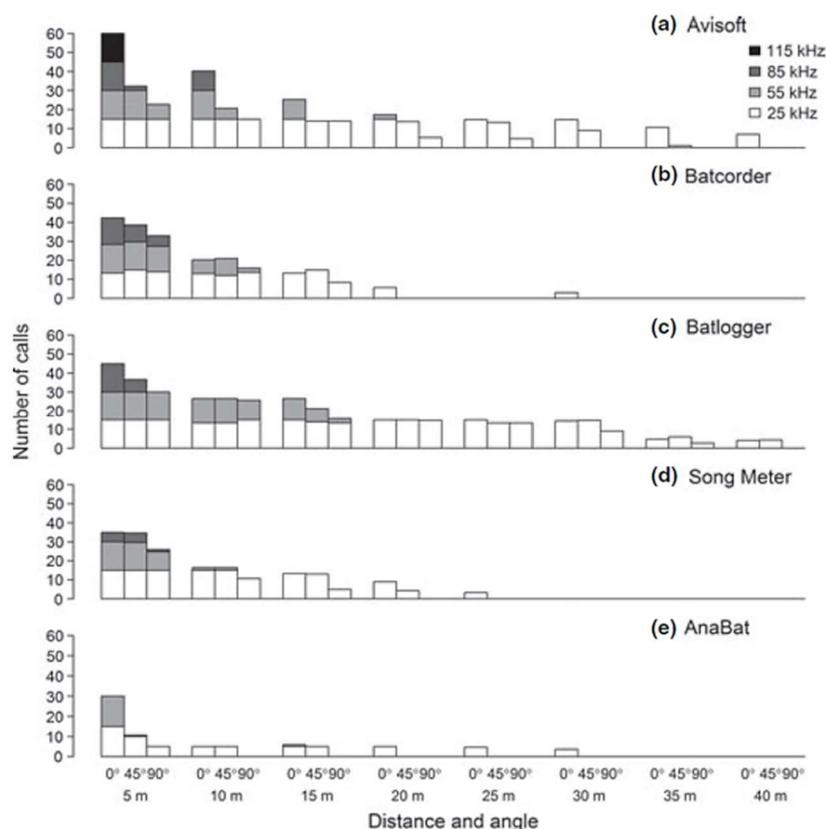


Figure 25 : Analyse comparative des capacités de détection des principaux enregistreurs à ultrasons, selon la distance, l'angle d'émission et les différentes plages de fréquences ultrasonores (source : Adams & al. 2012)

Mais en éolien, la comparaison des sensibilités de ces outils ne peut être déconnectée du contexte particulier lié à l'ambiance sonore d'une éolienne. Car les outils automatisés les plus sensibles peuvent aussi être les plus exposés aux biais générés par les faux positifs. La capacité des outils à distinguer les cris de chauves-souris au sein du bruit de fond ultrasonore mécanique et électromagnétique d'une nacelle est cruciale (Voigt et al. 2021). Le SRN en est le critère d'analyse (ratio entre les amplitudes du signal des chauves-souris et l'ensemble du bruit ambiant). Ce critère dépend à la fois des facteurs externes à l'outil, tels que la distance de la chauve-souris vis-à-vis du micro, du niveau de bruit ambiant (interférences ultrasonores et électromagnétiques) et de facteurs propres à l'outil comme le microphone, le préamplificateur, l'amplificateur et d'éventuels filtres. Le paramétrage des outils intervient pour faire évoluer ce paramètre. Certains enregistreurs ajustent automatiquement leur seuil de SRN au bruit ambiant (ex. Batmode), tandis que d'autres limitent volontairement la sensibilité de déclenchement en basses fréquences les plus impactées par le bruit ambiant d'une éolienne (ex. Batcorder). Sans compter que la sensibilité des micros diminue aussi plus ou moins vite avec le temps, selon les outils et l'exposition aux conditions climatiques. Le recalibrage régulier des micros est donc fortement recommandé pour optimiser les mesures (EUROBATS, Rodrigues et al. 2015, Groupe Chiroptères de la SFEPM 2016).

A propos de la phase de traitement des données, les capacités de outils utilisés (enregistreurs, logiciels) à faciliter cette phase d'analyse est aussi primordiale à prendre en compte car une forte sensibilité acoustique en phase d'acquisition peut générer énormément de temps d'analyse. Et si finalement le taux de parasites est énorme et incite à une phase d'analyse de mauvaise qualité, qui repose trop fortement sur des logiciels de traitement automatisés, ou pire, qui implique un échantillonnage du traitement de données, alors la forte sensibilité des enregistreurs n'a aucun avantage ; car cela remettrait en effet en question tout l'intérêt du suivi en continu et la volonté d'une recherche fine de phénomènes ponctuels d'activité en hauteur. Un SNR élevé qui facilite la détection, la sélection des cris de chauves-souris au sein du bruit de fond ambiant, facilite d'ailleurs aussi l'extraction des critères d'analyse des signaux ultrasonore pour une identification de qualité par la suite (identification automatisée et manuelle).

Dans tous les cas, il est important que l'utilisateur ait une pleine conscience de l'ensemble des limites des outils qu'il utilise et qu'il en tienne compte et le justifie dans les méthodes d'investigations qu'il choisit et dans l'analyse et l'interprétation des résultats. Car en fin de compte, indépendamment du choix de l'outil, au vu de tous les biais inhérents aux outils, aux méthodes, aux conditions particulières de vol des chauves-souris, aux conditions climatiques ou atmosphériques de propagation des sons, l'activité mesurée ne restera toujours qu'une vision partielle de la réalité. Mais si les données sont exploitées au mieux, alors cette activité partielle mesurée peut quand même permettre de caractériser un niveau de risque (notamment sur la base d'un référentiel d'activité à risque propre à l'outil et à son paramétrage), et peut aussi permettre d'identifier les conditions à risques (par croisement avec les données climatiques).

✓ A propos de la période et de la durée de l'étude de l'activité en hauteur

Pour ce qui concerne les dates de début et de fin de suivi acoustique en hauteur dans les rapports analysés (Figure 26), celles de l'installation des outils sont beaucoup plus étalées que celles de la fin de suivi. Cela peut s'expliquer par les différentes situations laissées ouvertes dans le protocole de suivi environnemental national en vigueur (2018), selon que l'étude d'impact initial avait ou non déjà bénéficié d'un suivi acoustique en continu en hauteur.

Vis-à-vis des prescriptions de ce protocole, la période de fin de suivi concentrée sur le mois de novembre est globalement cohérente voire supérieure aux prescriptions minimales (d'août à octobre). Mais pour la date de début de suivi, avec une majorité des études qui débutent entre avril et mai, les pratiques dépassent encore plus clairement le cadre minimal des prescriptions nationales.

Cela s'explique à nouveau ici par des prescriptions régionales souvent plus poussées qu'à l'échelle nationale. Cela va dans le sens d'un meilleur échantillonnage et donc une meilleure qualité des études, mais aussi plus globalement vers une progression des connaissances sur l'activité des espèces en plein ciel, aux marges de leur période d'activité principale.

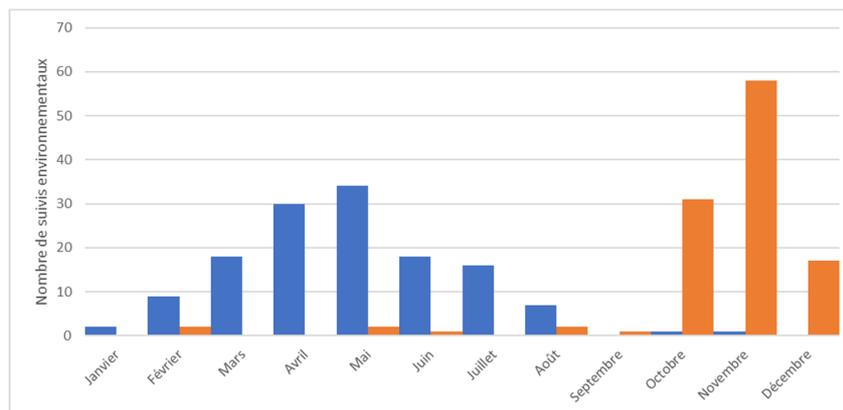


Figure 26 Mois de début (en bleu) et de fin (en orange) de suivi d'activité en hauteur dans l'échantillon de rapports de suivis d'impact

A propos de la durée des enregistrements acoustiques en hauteur, elle s'étale en moyenne sur 6,4 mois (Figure 27) pour l'échantillon de rapports analysés, mais avec des écarts types importants et des extrêmes sur plus d'une année d'enregistrements. Ces valeurs extrêmes sont à prendre avec précaution car l'analyse ne prend peut-être pas en compte d'éventuelles périodes d'interruptions techniques de suivi, qui peuvent aussi expliquer que la durée globale du suivi soit prolongée. De façon plus classique, la majorité des études s'étale entre 5 et 7,5 mois entre avril et mi-novembre.

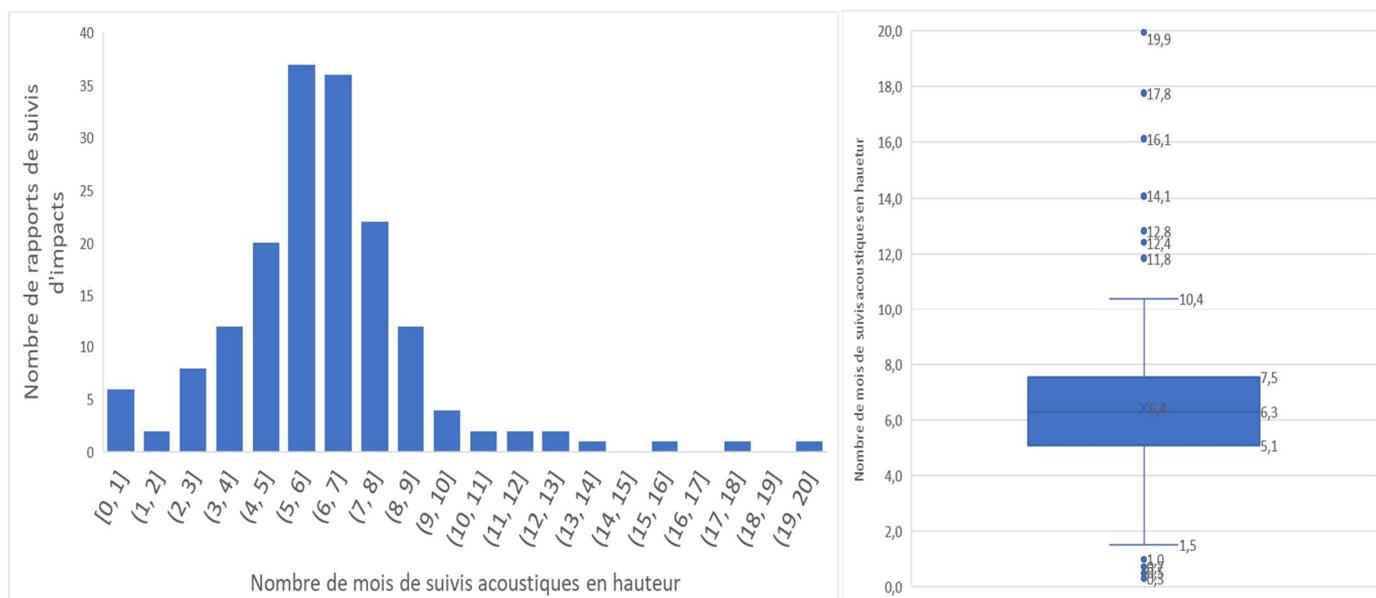


Figure 27 Histogramme de fréquence et diagramme en boîte de la durée des études acoustiques en hauteur dans l'échantillon de rapports de suivis d'impact

A retenir de cette partie

Seul un suivi sur mât de mesure ou depuis une nacelle d'éolienne peut faire en sorte que le suivi d'activité soit pertinent du fait de l'absence d'échantillonnage temporel et via un suivi à hauteur de zone à risque.

Au niveau des études d'impacts, seuls 30% des études bénéficient d'un suivi d'activité en continu et en hauteur. Et c'est surtout dans ces conditions qu'une mesure de régulation prédictive proportionnée est engagée en pratique. Inversement, ce sont paradoxalement surtout les études les moins centrées sur les conditions de risques en hauteur (qui ne bénéficient ni d'un suivi en hauteur ni d'un suivi en continu) qui aboutissent à l'absence de prescription de mesure de régulation.

Au niveau des suivis d'impacts, les nacelles d'éoliennes sont le principal support utilisé, pratique anticipée par rapport aux prescriptions techniques nationales de 2018, ce qui est favorable pour la qualité des suivis. Les outils d'enregistrements automatiques les plus utilisés sont ceux qui se sont les plus précocement spécialisés pour une utilisation en nacelle d'éoliennes. La période de suivi d'impact est plutôt conforme avec celle exigée par le protocole de suivi environnemental en vigueur voire dépasse aussi souvent les minimum requis (dates de début de campagnes plus précoces), là encore, à la faveur de la qualité des études.

2.2.2.3. Comment sont traités, analysés et présentés les résultats de l'étude d'activité en hauteur dans le processus de régulation ?

Pour privilégier la base de données la plus fournie, l'analyse des pratiques concernant le traitement des résultats de l'étude acoustique en hauteur est issue uniquement de la base de données des rapports de suivis d'impacts des parcs en exploitation (« BDD Pratiques de la régulation / parc exploités », N=559).

2.2.2.3.1. Rappel des prescriptions nationales

Au niveau du Guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens en vigueur (version 2020), les prescriptions à propos de l'analyse et la présentation des résultats d'études d'activités en altitude sont peu étayées (paragraphe 6.4.3.2.4 p. 107), puisque ce volet d'étude est présenté comme nécessaire uniquement pour certains projets (projets en forêt, projet à enjeux forts d'un point de vue bibliographique...). Nous retiendrons quand même les éléments suivants qui le concernent :

- *Le paramétrage des appareils doit être indiqué,*
- *La sensibilité des microphones doit être vérifiée et recalibrée au moins chaque année.*
- *L'analyse des données récoltées nécessite d'une part de bonnes connaissances des chiroptères et de leurs signaux acoustiques, mais aussi des logiciels spécifiques pour « retraduire » les enregistrements. Il faudra s'assurer que ces compétences sont à la portée du bureau d'étude pour bénéficier de données solides et fiables.*
- *Les informations fournies par le suivi en hauteur sont utiles pour analyser précisément les risques d'impacts par mortalité et pour proposer des mesures adéquates et proportionnées par rapport à ces risques.*

Au niveau du protocole de suivi environnemental en vigueur (version 2018), on peut rappeler que » [...] *L'analyse doit être menée également pour faire en sorte de valoriser finement l'ensemble des données brutes et informations qui y sont associées (cris sociaux, buzz de chasse, groupe d'individus...), et sans échantillonnage ou organisation du jeu de données qui peut tendre à lisser l'information. [...]* ».

2.2.2.3.2. Pratiques concernant les analyses et la présentation des résultats d'activité en hauteur

➤ Objectifs de l'histogramme chronologique d'activité

Une fois que toutes les données acoustiques sont analysées et les espèces déterminées, l'**histogramme chronologique d'activité en hauteur** est le graphique de base qui permet de synthétiser, analyser et présenter l'activité chiroptérologique en continu à hauteur de rotor pour la plage de suivi. Il est essentiel pour une compréhension de synthèse des modalités de fréquentation de la zone à risque par les chiroptères, par espèces ou groupes d'espèces et par périodes. Il permet en outre de ;

- **Témoigner du caractère continu** du suivi ou au contraire mettre en évidence l'importance des périodes non suivies (problèmes techniques, interruption du suivi, échantillonnage...),
- Quantifier le **niveau d'activité** et de le mettre idéalement en relation avec un **référentiel d'activité** comparatif, de façon globale (cf. Figure 2),
- et/ou de façons plus détaillée, en distinguant notamment
 - des **périodes d'activité** régulière ou de moindre activité,
 - les phénomènes de **pics d'activité** intenses et ponctuels (ex. pipistrelles),
 - la **régularité** plus ou moins marquée de **fréquentation** souvent moins intense **d'espèces de haut vol et / ou migratrices** (ex. noctules),
- Mettre en relation ces éléments avec la **phénologie des espèces** et les **conditions climatiques**,
- Le tout vers la précision des **niveaux et conditions d'exposition à un risque** de mortalité, et donc la prise de décision et le dimensionnement d'une mesure de régulation.
- Permettre des **comparaisons chronologiques de synthèse avec les résultats de mortalités** au niveau des parcs en activité, avec les **périodes de régulation** et les plages de suivis,

Au-delà des intérêts directs de ces analyses de base dans le processus de régulation, l'histogramme chronologique d'activité est aussi important pour ;

- Permettre des comparaisons entre sites ou entre éoliennes sur une même campagne de suivi, et ainsi être en mesure de distinguer des **périodes et conditions d'activité qui s'expriment à large échelle et celles qui dépendent de phénomènes plus localisés**,

- Anticiper d'éventuelles comparaisons objectives de l'activité en hauteur sur plusieurs années sur le même site, la même éolienne, en fonction de l'évolution interannuelle des conditions climatiques.
 - C'est notamment essentiel à prendre en compte lorsqu'il s'agit d'estimer **l'effet de la mise en œuvre ou de l'évolution d'une mesure de régulation entre deux années**,
 - Voire permettre une analyse comparative de l'activité en hauteur mesurée avant-projet (mât de mesure de vent) et après mise en service du parc, et tenter de **caractériser les éventuels effets d'attractivité ou d'aversion** des chauves-souris générés par le parc.

Remarque : aucun des rapports traités n'a présenté une analyse de l'activité des chauves-souris à hauteur de rotor via un suivi vidéo nocturne en continu (images en infra-rouge ou thermique). Mais le cas échéant, la présentation des résultats peut parfaitement correspondre à ce qui est proposé ici pour le suivi acoustique.

➤ Pratiques en termes de présentation de l'histogramme chronologique d'activité

Vu l'importance de ce type de présentation dans le processus de régulation, il a été recherché dans les rapports de suivis d'impacts bénéficiant d'un volet d'étude de l'activité en hauteur (N=180), si **ce type de présentation était disponible. Les graphiques suivants (Figure 28) montrent que c'est bien le cas pour ¾ des rapports.** Les rapports qui ne le présentent pas ne sont pas toujours les plus anciens car pour presque la moitié de ceux réalisés après 2018, il manque cette information essentielle.

Pour les rapports qui présentent ce type de graphique, l'unité de temps utilisée (nuits, semaines, décades, quinzaines, mois...) a été relevée dans la base de données. On note alors que la grande majorité d'entre eux présentent le graphique à l'échelle de la nuit, qui permet une appréciation fine de la situation et des conditions de risques. 19% des rapports restent encore basés sur une présentation par semaines, décades, 1/2 mois ou mois, moins pertinente pour l'analyse et le processus de régulation.

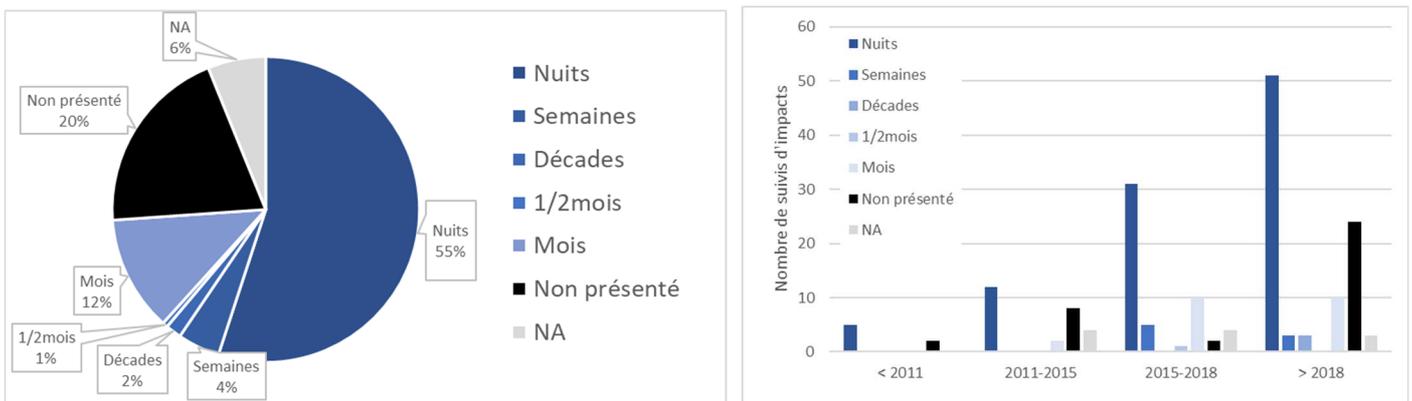


Figure 28 Graphiques des pratiques en termes de présentation de l'histogramme d'activité des chauves-souris en hauteur

➤ Pratiques concernant le choix de la variable d'analyse de l'intensité d'activité des chauves-souris à hauteur de rotor

Le choix de la variable utilisée pour caractériser l'activité des chauves-souris est important car il peut orienter ou limiter la portée de l'analyse de l'activité dans le cadre du processus de régulation. Ce choix joue notamment fortement sur les contraintes de comparaison des résultats d'un site à l'autre, d'une année à l'autre, ou dans la prise en compte du référentiel d'activité.

Dans la pratique, les **termes utilisés sont nombreux dans les rapports, avec souvent plusieurs termes pour désigner probablement la même variable** (ex. « nombre de contacts » / « nombre de séquences ») **et des termes dont la définition est souvent floue** (ex. « nombre d'enregistrements » / « nombre de données », « nombre de cris », « nombre de sons » ...).

De façon générale, dès lors que la variable utilisée est un nombre d'unités acoustiques, les résultats dépendent fortement des choix de paramétrage des enregistreurs, et notamment du « trigger » qui définit la durée maximale de l'enregistrement à partir de la détection d'une chauve-souris. Pour une même durée d'activité d'une même chauve-souris, les résultats décomposés par différents triggers (ex. fichiers de 200, 400, 800 ms, 1s, 5s...) varient très fortement entre plusieurs enregistreurs et leur paramétrage. Dans ces conditions, pour comparer les données d'un rapport à l'autre, il faut au moins que les paramétrages utilisés soient précisés (cf. recommandations du Guide de l'étude d'impact sur l'environnement version 2020 en vigueur, MTE 2020).

Au-delà du choix de la variable et du terme associé, les **différences de traitement au niveau des rapports de suivis d'impact résident aussi entre une simple notion d'intensité d'activité (ex. nombre de contacts) et son lien avec une unité de temps** utilisée pour l'histogramme de la chronologie d'activité (ex. nombre de contacts par mois, nombre de secondes d'activité par nuit...).

Enfin, la version en vigueur du Protocole de suivi environnemental (MTES / DGPR/ DGALN 2018) reconnu par l'état au titre de l'article 12 de l'arrêté ICPE du 26 août 2011 précise que « [...] *L'analyse doit être menée [...] sans échantillonnage ou organisation du jeu de données qui peut tendre à lisser l'information.* [...] ». Tout échantillonnage dans l'analyse du jeu de données acoustiques est donc réglementairement interdit. Toutes les données doivent être analysées vers la détermination des espèces / groupes d'espèces. Dans la présentation des résultats, la notion de « lissage de l'information » pourrait concerner la « minute positive » qui consiste à résumer l'activité des chauves-souris sous la forme de la présence / absence d'une espèce pendant une minute (abstraction de toute perception d'intensité d'activité par minute, ni en durée ni en nombre d'individus). Il faut penser que l'exposition au risque de mortalité au niveau des éoliennes peut varier considérablement entre un comportement de vol d'un individu en transit ponctuel (ex. noctule), des vols réguliers d'une ou deux pipistrelles en transits actifs le long de corridors proches du rotor, ou encore des phénomènes de rassemblements massifs et parfois très ponctuels de groupes d'individus au niveau du rotor (ex. pics massifs de pipistrelles parfois pendant quelques minutes). Les pics ponctuels d'activité des pipistrelles au niveau des nacelles pourraient expliquer une grande partie des cas de mortalités (Langlois et al. 2017, Beucher 2020, Richardson et al. 2021). C'est sur ce même constat que le groupe Chiroptères de la SFPEM recommande aussi l'absence de lissage d'analyse de données [...] *tout protocole ou outil d'analyse statistique qui tend à simplifier et à lisser ces pics d'activité (utilisation de moyennes d'activité sans écart type, inventaires limités à la présence / absence d'une espèce...) limite les capacités à détecter et caractériser le risque* [...] (Groupe Chiroptères de la SFPEM, 2016). Le paramètre « minute positive » ne permettrait donc pas de différencier finement ces types de comportements et les conditions qui y sont liées et pourrait donc représenter un frein au processus de dimensionnement proportionné de la régulation.

Parmi l'échantillon de rapports de suivis d'impacts analysés et qui traitent d'un suivi d'activité en hauteur (N=180), **16% ne précisent pas clairement la variable d'analyse utilisée**. Pour les autres, au vu de la diversité des termes utilisés, il a été fait le choix ici de rassembler les termes « contacts » et « séquences » qui semblent toujours qualifier la même notion d'unité d'activité selon le trigger utilisé. Pour les termes « enregistrements » ou « données », il est parfois difficile de savoir si on parle d'unités d'activité (selon le trigger) ou bien de l'ensemble des émissions ultrasonores (cris) sans distinction par séquences. Le graphique suivant (Figure 29) montre que **ce sont les variables « Nombre de contacts » et « Secondes d'activité cumulée par nuit » qui sont les plus utilisées**. La **tendance évolutive est plutôt positive avec à la fois vers une précision des termes** (disparition progressive du terme « nombre de données / nuits » depuis 2015) et une **progression de la notion de durée cumulée d'activité à risque** à hauteur de rotor (secondes / nuit).

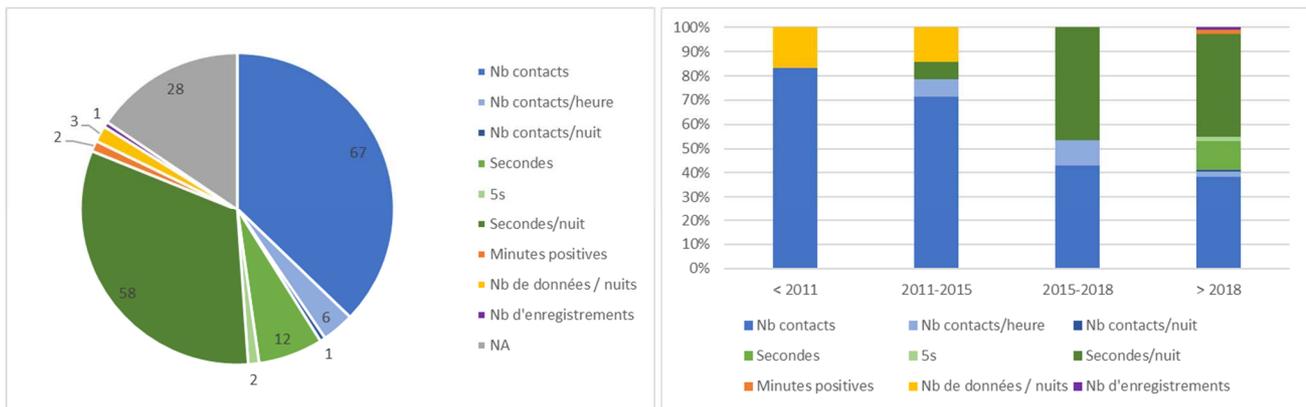


Figure 29 Graphiques des pratiques pour le choix de la variable d'analyse de l'activité des chauves-souris en hauteur

➤ Pratiques en termes d'analyses comportementales

Pour exploiter au mieux les informations fournies par la chronologie d'activité mesurée, il a été recherché dans les rapports bénéficiant du volet d'étude de l'activité en hauteur (N=180) si des éléments d'analyse des principaux types de comportements de vols par espèces ou groupes d'espèces étaient présentés tels que ;

- La distinction de fréquentation des **espèces de haut-vol**, des **migratrices** et des **espèces de lisières**,
- L'analyse des **pics d'activité** ponctuels avec zoom à l'échelle horaire pour mieux caractériser ces phénomènes,
- L'exploitation des informations liées à la distinction de **cris sociaux** ou de **buzz de chasse** dans les données acoustiques,

Les graphiques suivants (Figure 30) montrent que **la majorité des rapports présentent au moins en partie ces éléments. Mais 1/3 ne le font pas.** A l'échelle temporelle, aucune tendance évolutive laisse présager d'une amélioration des pratiques à ce propos.

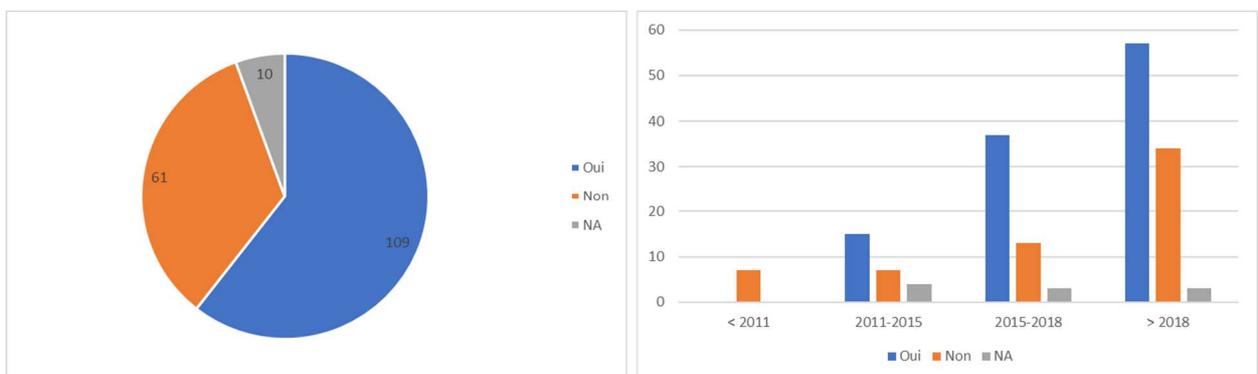


Figure 30 Graphiques des pratiques en termes d'analyses comportementales dans la chronologie d'activité des chauves-souris en hauteur

➤ Pratiques en termes d'analyses de la phénologie des espèces

Pour exploiter au mieux les informations fournies par la chronologie d'activité mesurée, il a été recherché si les rapports bénéficiant du volet d'étude de l'activité en hauteur (N=180) présentaient ou non une analyse phénologique détaillée de la fréquentation du site par espèces ou groupes d'espèces.

Les graphiques suivants (Figure 31) montrent que **73% des rapports présentent au moins en partie ces éléments**. 14 ne le font donc pas. A l'échelle temporelle, on note toutefois une amélioration des pratiques à ce propos.

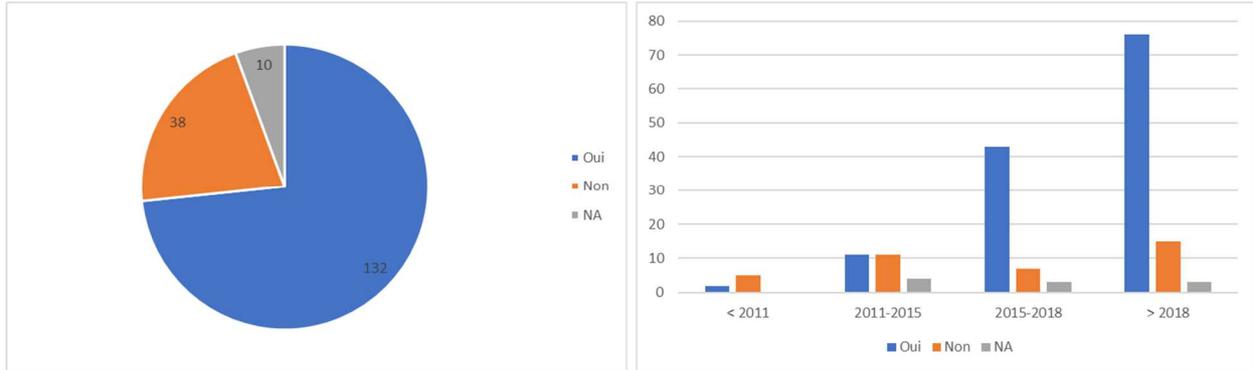


Figure 31 Graphiques des pratiques en termes d'analyses de la phénologie des espèces dans la chronologie d'activité des chauves-souris

➤ Pratiques concernant l'utilisation d'un référentiel d'activité pour analyser l'intensité d'activité

Pour exploiter au mieux les informations fournies par la chronologie d'activité mesurée, il a été recherché si les rapports bénéficiant du volet d'étude de l'activité en hauteur (N=180) bénéficiaient ou non d'un référentiel d'activité. Il ne s'agit pas ici d'apprécier la façon dont ce référentiel avait été construit, mais simplement de savoir si l'auteur s'est préoccupé de comparer les résultats obtenus avec un référentiel d'intensité d'activité propre à l'outil acoustique qu'il utilise, soit à une échelle globale (ex. niveaux d'activité nocturne par espèces ou groupes d'espèces), soit à une échelle plus détaillée (ex. classes de niveaux d'activité de références associées à l'histogramme chronologique). Cette prise de recul sur des retours d'expérience de référence est en effet essentielle pour justifier d'une mesure de régulation et de son dimensionnement.

Les graphiques suivants (Figure 32) montrent que **moins de la moitié des rapports (43%) bénéficient d'un référentiel d'activité**. A l'échelle temporelle, on ne note pas d'amélioration des pratiques à ce propos.

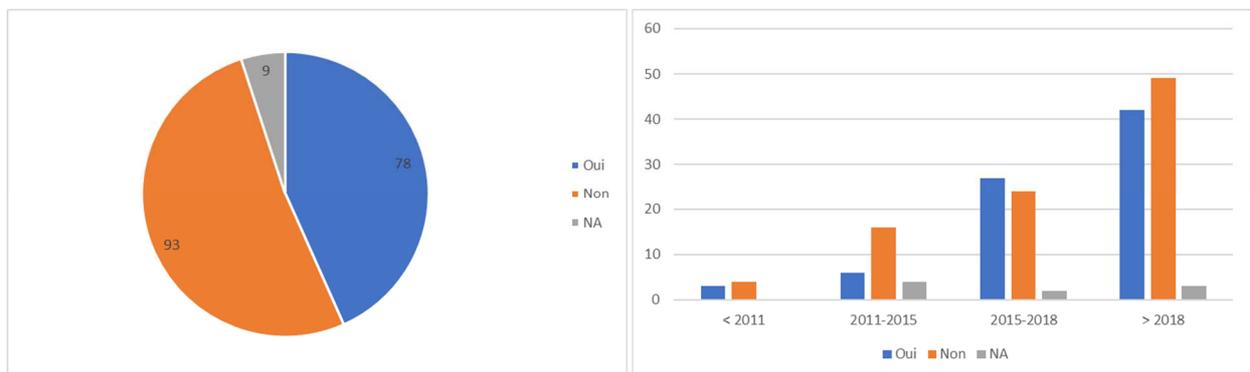


Figure 32 Graphiques des pratiques sur la prise en compte ou non d'un référentiel d'activité dans l'analyse de la chronologie d'activité des chauves-souris en hauteur

➤ Pratiques concernant l'analyse des conditions de risques

Pour justifier de l'effet des conditions climatiques ou saisonnières sur l'activité des chauves-souris en hauteur et envisager des mesures proportionnées sur les conditions de risques, des graphiques ou tests de corrélations entre des données d'activité et des paramètres climatiques doivent être réalisés et présentés dans les rapports.

Il a donc été recherché dans l'échantillon de rapports bénéficiant du volet d'étude de l'activité en hauteur (N=180), si cette analyse **croisée entre activité et conditions climatiques** avait été engagée, et si oui ;

- Est-ce que l'analyse a été réalisée ;
 - Finement **par espèces** (au moins pour les plus patrimoniales, ex. évolution de l'activité de la Grande noctule en fonction de la vitesse du vent, ou heures nocturnes de fréquentation du site par la Grande noctule.) ?
 - Plus globalement, **par groupes d'espèces et typologies comportementales** (ex. évolution de l'activité des espèces de haut vol / espèces de lisières en fonction de la vitesse du vent, ou conditions de vent et de température mesurées pour les principaux pics d'activité...) ?
 - Ou uniquement sur une **approche interspécifique globale** (ex. évolution de l'activité des chauves-souris sur le site en fonction de la vitesse du vent...) ?

- **Quels sont les paramètres climatiques ou temporels testés** (vitesse de vent, température, orientation du vent, heures de la nuit, saisonnalité...) ?

De façon générale, parmi l'échantillon de rapports traités bénéficiant d'un suivi d'activité en hauteur (N=180), environ **¼ ne présente aucune analyse comparée avec les conditions climatiques ou saisonnières** et sont donc dans l'incapacité de définir objectivement les conditions de risques sur le site d'étude (Figure 33).

Pour ceux qui cherchent à tenir compte des conditions climatiques, la **majorité (46%) le font par groupes d'espèces**, c'est-à-dire surtout en différenciant les espèces de lisières (ex. pipistrelles) des espèces de haut-vol et ou migratrices (ex. noctules). **¼ ne différencie pas les espèces ou groupes d'espèces**, c'est à dire en traitant globalement l'activité des chiroptères dans leur sa globalité. Et **moins de 10% d'entre eux cherchent à différencier l'effet des conditions climatiques par espèces**, et la plupart du temps uniquement en ciblant quelques espèces jugées patrimoniales et/ou sensibles (ex. Grande noctule, Noctule commune, Minioptère de Schreibers, etc...). A propos de l'évolution des pratiques à ce propos, on constate que la prise en compte des conditions climatiques est assez généralisée depuis 2015. En revanche, la prise en compte des groupes d'espèces reste à prédominant dans les pratiques au fil du temps.

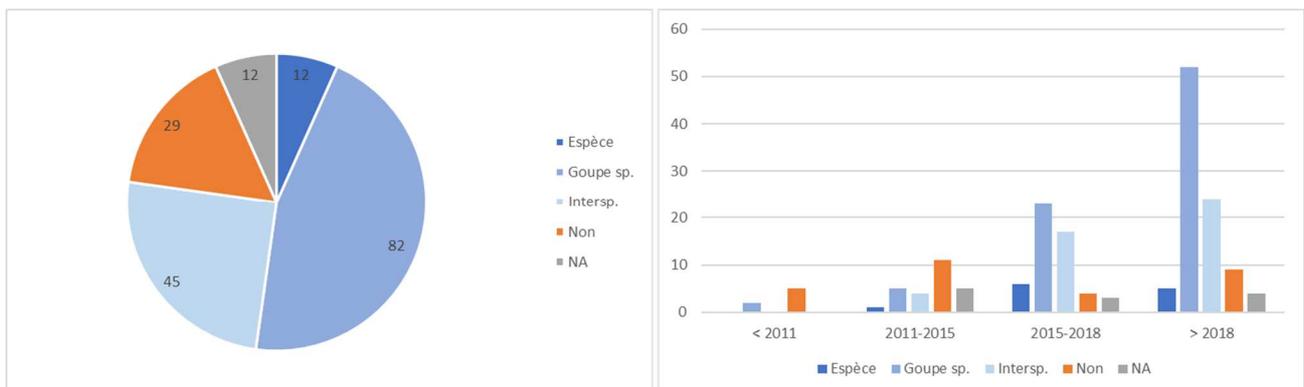


Figure 33 Graphiques des pratiques sur la prise en compte des conditions climatiques par espèces ou groupe d'espèces dans l'étude de l'activité des chauves-souris en hauteur

Quant aux paramètres étudiés, les quatre principaux sont régulièrement la vitesse de vent, la température, le rythme d'activité nocturne et la saisonnalité. L'orientation du vent est bien moins régulièrement prise en compte dans les analyses, de même que les précipitations. A l'échelle temporelle, on note une amélioration progressive des pratiques avec une généralisation de la prise en compte des principaux paramètres (vitesse de vent, température, heures et saisonnalité) depuis 2015.

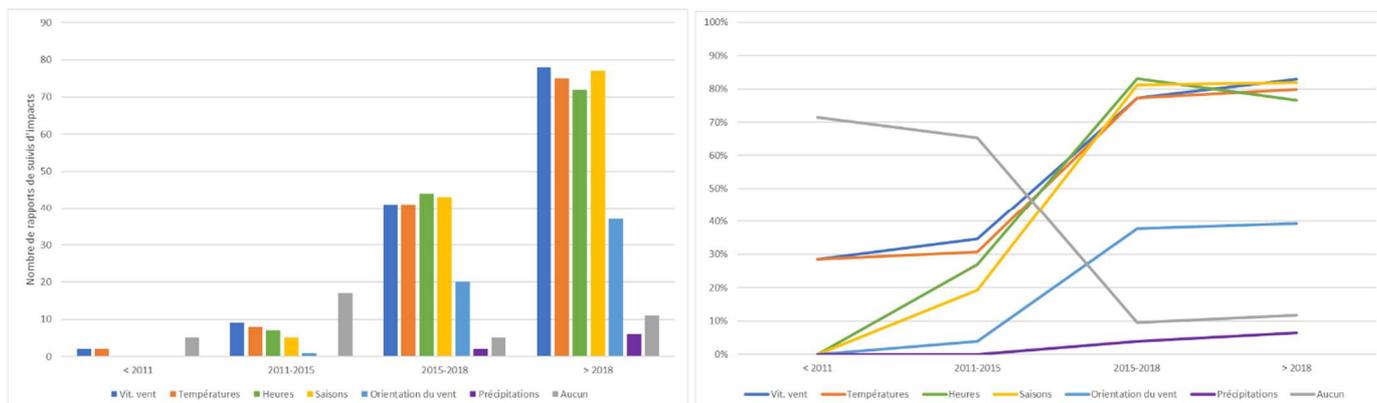


Figure 34 Graphiques des pratiques des paramètres climatiques pris en compte dans l'étude de l'activité des chauves-souris en hauteur

A retenir de cette partie

De façon générale, la majorité des rapports qui bénéficient d'un suivi d'activité en hauteur pratiquent une analyse structurée des résultats. Ainsi ;

- ¾ d'entre eux présentent bien une synthèse chronologique de l'activité, par nuit,
- Plus de la moitié des rapports procède à une analyse détaillée des comportements (distinctions des espèces de haut-vol et des espèces de lisières, analyse des pics d'activité, recherche de cris sociaux ou buzz de chasse...),
- 73% des rapports procèdent aussi à une analyse des phénologies des espèces avec une progression des pratiques à ce niveau.

En revanche, parmi les contraintes, on note que ;

- les unités d'estimation de l'intensité d'activité sont encore souvent floues avec un besoin de clarification des termes utilisés. Ces problèmes tendant toutefois à réduire avec le temps, avec une utilisation plus marquée d'un « nombre de contacts » et à s'améliorer avec la progression de la notion de durée d'activité à risque (secondes cumulées d'activité à risque),
- Moins de la moitié des rapports bénéficie d'un référentiel d'activité, et les pratiques à ce niveau ne semblent pas beaucoup évoluer,
- ¼ des rapports ne procèdent pas à une analyse des conditions climatiques d'activité, et donc ne peuvent pas définir objectivement les conditions à risques pour dimensionner la régulation.

En ce qui concerne l'analyse des conditions à risques, elle est généralement pratiquée par groupes d'espèces (espèces de haut-vol, espèces de lisières, etc...). L'analyse plus fine par espèce reste minoritaire, et ne concerne que quelques espèces phares.

Les paramètres climatiques testés pour définir les conditions à risque sont très majoritairement la vitesse de vent, la température, les heures, et la saisonnalité.

2.2.2.4. Comment est utilisé le suivi de la mortalité dans le processus de régulation ?

L'intérêt du suivi de la mortalité dans le processus de régulation concerne :

- Les parcs éoliens qui ne bénéficient pas encore d'une mesure de régulation et pour lesquels l'intérêt de la mesure est étudié. L'échantillon de données correspondant à cette situation concerne 368 rapports analysés dans la base de données.
- Les parcs éoliens qui bénéficient déjà d'une mesure de régulation, et pour lesquels il s'agit d'analyser l'efficacité de la mesure vers une validation ou une optimisation (mesure corrective). L'échantillon de données correspondant à cette situation concerne 112 rapports analysés dans la base de données.

Vis-à-vis du processus de régulation, nous avons vu plus haut que le suivi de la mortalité :

- **Permettait de quantifier l'impact** (estimation relative) et donc d'alimenter la décision d'engager une mesure,
- Mais ne permettait que **partiellement de qualifier les conditions de risques** (périodes, espèces concernées, sans précision des conditions climatiques) et donc de dimensionner la mesure.

2.2.2.4.1. Rappel des prescriptions nationales

Le protocole de suivi environnemental version 2018 est la version qui détaille le plus les modalités de mise en œuvre, de traitement des résultats et d'interprétation du suivi de la mortalité des chiroptères sous les éoliennes, pour faire le constat de l'impact et pour dimensionner au besoin des mesures correctives proportionnées. C'est la première version du protocole qui invite à coupler les suivis d'activité en hauteur et les suivis de mortalités sous les éoliennes pour permettre le constat de l'impact et le dimensionnement de mesures correctives. Nous invitons le lecteur à se référer à ce document.

Parmi l'ensemble des prescriptions, nous retiendrons surtout les suivantes pour lesquelles les pratiques nationales seront analysées :

- **Période de suivi minimum entre les semaines 20 et 43 (mi-mai à fin-octobre),**
- Pression de suivi minimale de **20 passages,**
- Mais **élargissement de la plage de suivi et/ou de la pression de suivi selon les enjeux** si :
 - L'étude d'impact évoque des enjeux à d'autres périodes ;
 - Des arrêtés préfectoraux relatifs au parc concerné le précisent ;
 - Les premiers résultats des suivis de mortalité indiquent des niveaux de mortalité significatifs nécessitant la réalisation d'investigations complémentaires.
- **En cas de reconduction du suivi, la ou les période(s), le nombre de prospections et la fréquence des prospections de l'année n+1 pourront être modifiées,** en accord avec le Préfet (par exemple afin de cibler le suivi sur une espèce spécifique).
- Recommandation de réaliser au moins **2 autotests annuels** pour évaluer l'efficacité du chercheur et la persistance des cadavres.
- **Prise en compte de l'évolution de la végétation** au sol aussi bien en phases de tests (ex. distinction de la détection et de la prédation en fonction de la végétation), en phase de suivi (ex. largeur des transects) et dans l'analyse des résultats (ex. « intégrée aux calculs de mortalité »).

2.2.2.4.2. Pratiques de mise en œuvre du suivi de la mortalité au niveau des parcs régulés

➤ Pratiques concernant la durée du suivi de la mortalité

Pour les rapports de suivi d'impacts analysés qui détaillent les modalités de mise en œuvre du protocole de suivi de la mortalité (N=480), la **durée du suivi est très variable** avec des extrêmes allant d'une semaine à plus de trois ans.

Pour **les extrêmes les plus bas (quelques jours à quelques semaines), cette courte période de suivi est difficilement justifiable** (sur le plan statistique et écologique) même dans le cadre d'une reconduction de suivi ciblé, permise par la version 2018 du Protocole de suivi environnemental. Il s'agit en fait majoritairement de suivis qui ont été réalisés avant l'édition 2018 du protocole de suivi environnemental, avec une pression de suivi généralement limitée à quatre passages, plus ou moins étalés dans le temps, en conformité avec la version 2015 du Protocole de suivi environnemental. Ces suivis ont alors été engagés quasiment tous dans le cadre d'un nouveau parc installé (hors reconduction de suivi).

Les extrêmes les plus hauts correspondent à des parcs qui ont été suivis régulièrement sur plus d'une année voire plusieurs années successives et pour lesquels les données ont été traitées et les rapports produits en fin de campagne interannuelles. Des plages de suivi si importantes ne signifient pas forcément une pression de suivi intense.

De façon plus générale, toutes périodes confondues, les graphiques suivant (Figure 35) montrent que le suivi est engagé pour **5,8 mois en moyenne**. Cette moyenne est globalement cohérente avec les prescriptions du protocole national en vigueur (5,5 mois minimum entre mi-mai et fin octobre). Pour autant plus de la moitié de l'échantillon de suivis analysés présente une durée inférieure à ce minimum national.

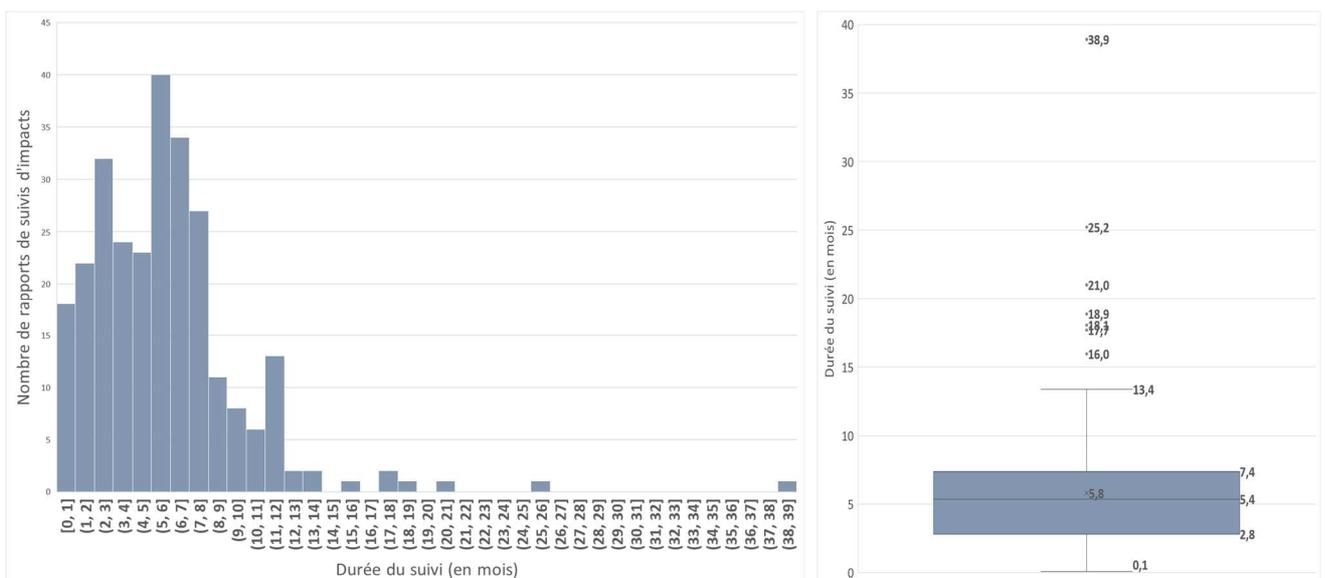


Figure 35 Histogramme de fréquence et diagramme en boîte de la durée des suivis de la mortalité dans l'échantillon de rapports de suivis d'impacts

Les graphiques suivants (Figure 36) décomposent l'analyse dans le temps pour apprécier l'évolution des pratiques en fonction de l'évolution des prescriptions nationales. Leur analyse comparée montre une **réduction progressive des écarts-types dans le temps** avec :

- une **réduction des extrêmes maximum**. On pouvait penser que les prescriptions de la version 2018 du protocole national auraient eu tendance à limiter l'engagement de suivis à moins d'une année par campagne, mais on retrouve encore des suivis étalés sur 13 à 18 mois après 2018. Les rapports les plus anciens ne sont pas ceux pour lesquels la durée des suivis de mortalité était la plus courte. Au contraire, on note à nouveau que pour les premiers rapports réalisés, c'est-à-dire sans cadre méthodologique national officiel, les méthodes engagées pouvaient être plus poussées. Le nombre de rapports était cependant beaucoup plus faible et peu représentatif de réelles pratiques nationales généralisées ;
- une **réduction moins évidente des extrêmes minimum**. Mais réalité, entre les contextes des protocoles de 2015 et 2018, ces plages de suivis très courtes n'ont plus la même vocation. Sous

la version 2015 du protocole national, elles sont exploitées pour le premier suivi de mortalité d'un parc. Alors que sous la version 2018 du protocole national, elles ne sont exploitées quasiment plus que lors d'une reconduction du suivi d'un parc sur plusieurs campagnes (après mesure corrective) ;

- Une **réduction de l'écart entre les quantiles (notamment après 2018) et donc une standardisation progressive des pratiques.**

Quant à la moyenne de durée de suivi, si elle avait été sensiblement réduite pendant la version 2015 du protocole national, elle est bien au niveau du seuil minimum imposé par le protocole de 2018 depuis 2018. La médiane à 5,3 mois de suivi après 2018 signifie toutefois que plus de la moitié des suivis s'étale sur moins du seuil minimum prescrit. Cela s'explique par le fait qu'une partie d'entre eux correspond à des suivis reconduits (optimisation de la mesure).

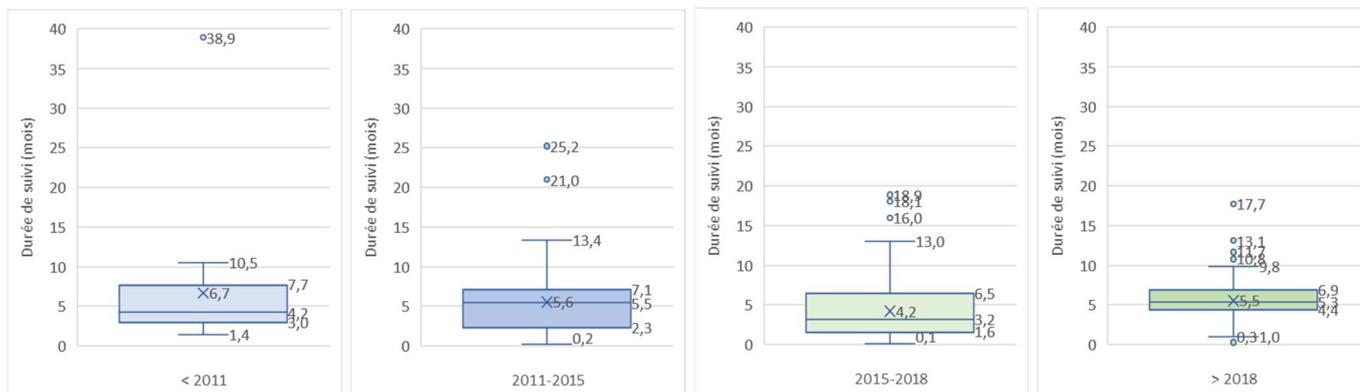


Figure 36 Evolution comparative des diagrammes en boîte de la durée des suivis de la mortalité au fil du temps

➤ Pratiques concernant la pression de suivi de la mortalité

Pour ce qui concerne la pression de suivi de la mortalité, l'analyse de l'évolution des pratiques (Figure 37) montre que :

- **Avant 2011**, c'est-à-dire sans cadre méthodologique national, le peu de suivis engagés s'organise avec **une pression très majoritairement supérieure à 20 passages** et jusqu'à plus de 60 passages pour 10% d'entre eux,
- **Depuis 2011**, suite à la publication de l'article 12 de l'arrêté du 26 août 2011 qui a imposé la mise en place d'un suivi de l'impact des parcs éolien, le nombre de suivis réalisés a fortement progressé. Mais sans réel cadrage méthodologique, la **pression moyenne des suivis de la mortalité s'est réduite** avec une majorité de suivis engagés pour moins de 20 passages par campagne de suivi,
- La **version 2015** du protocole national n'a pas sensiblement généré de progression des pratiques à ce niveau, si ce n'est une proportion plus importante de suivis basés sur 10 à 19 passages plutôt que moins de 10 passages auparavant,
- Finalement, **c'est la nouvelle version du protocole national qui a fait le plus évoluer les pratiques à ce niveau depuis 2018** puisque **90% des suivis réalisés depuis respectent ou dépassent le minimum prescrit de 20 passages** par suivi annuel. Plus aucun suivi à moins de 10 passages n'est constaté, mais presque 10% d'entre eux ne respectent toujours pas ce seuil. La majorité des suivis (45%) est basée sur ce seuil minimum de 20 passages. Mais 40% d'entre eux dépassent assez largement ce seuil (plus de 30 passages), dont 8% dépassent même de 3 fois le minimum requis (> 60 passages).

Compte tenu des éléments précédents, la moyenne du nombre de passages engagés lors des suivis de la mortalité est généralement peu représentative étant donnée la diversité des pratiques. Les cartes de la Figure 38 mettent en lumière cette diversité en fonction de l'évolution des prescriptions nationales et des disparités régionales. La **diversité des pratiques est notamment assez marquée entre le nord et le sud de la France avec des pressions de suivi régulièrement plus importantes au sud qu'au nord**, et ce, tout au long du développement des suivis. Les disparités régionales étaient plus marquées avant 2018. Depuis 2018, en imposant le minimum de 20 passages, le **protocole national aura en fait surtout permis d'équilibrer autour**

de 24 les moyennes de passages pour les régions de la moitié nord. Mais l'Occitanie et la Nouvelle Aquitaine bénéficient de moyennes bien supérieures.

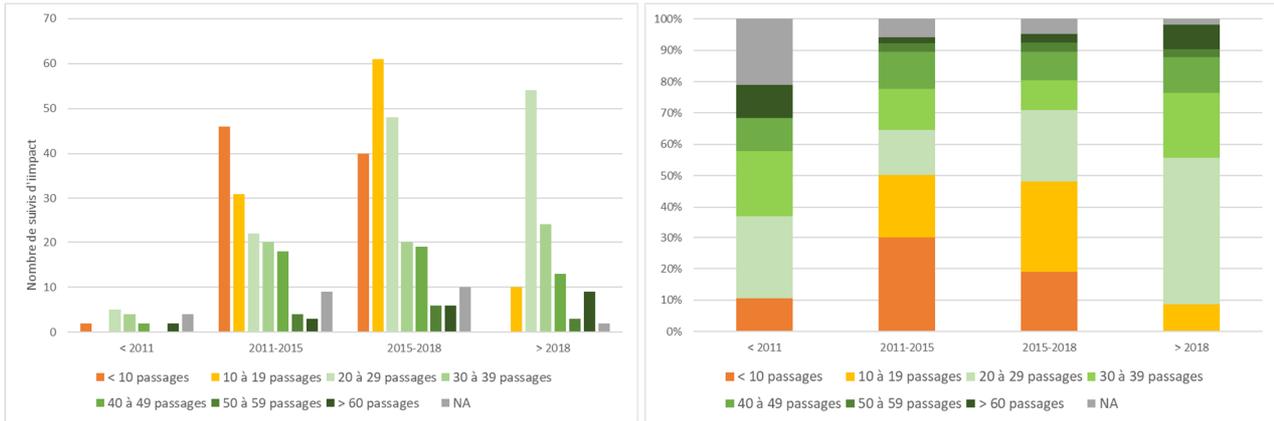


Figure 37 Evolution comparative du nombre de passages de suivis de la mortalité dans le temps (nombres et pourcentage)

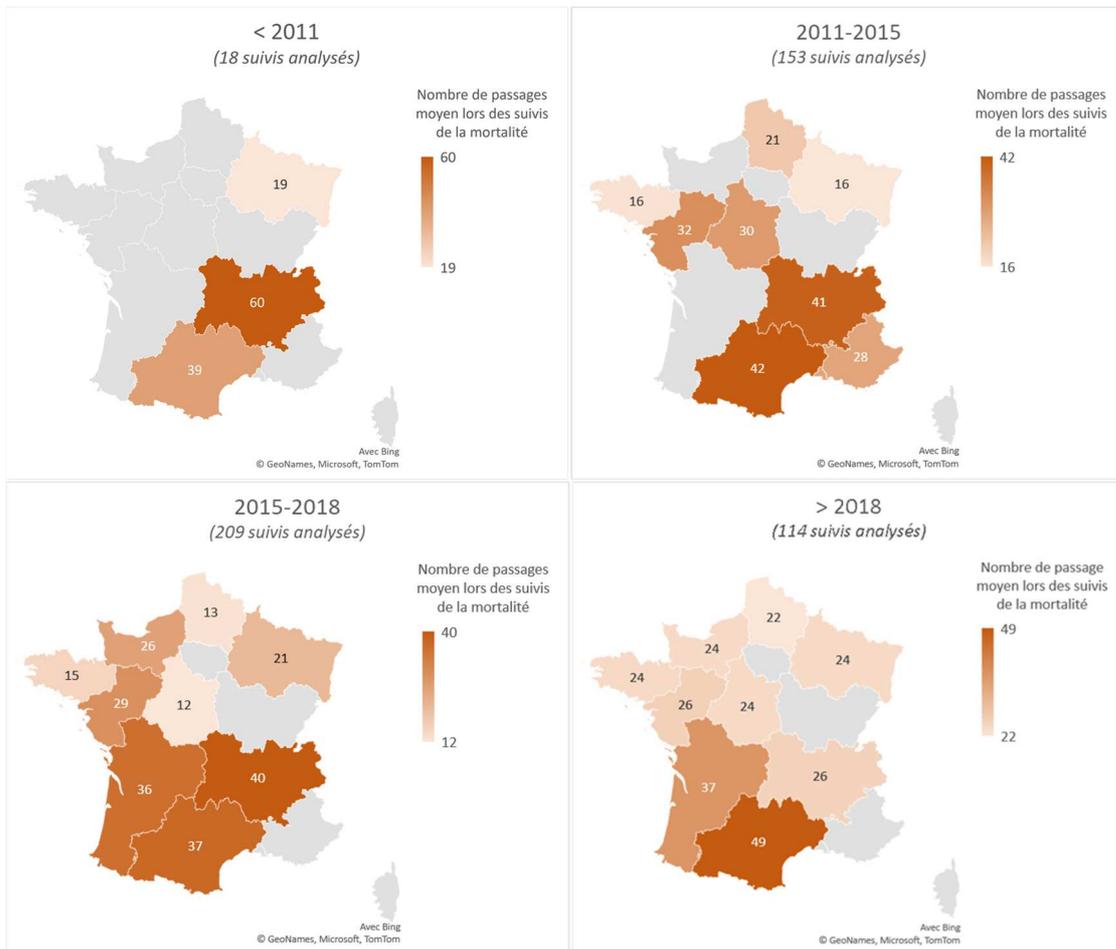


Figure 38 Evolution comparative du nombre de passages moyens des suivis de la mortalité par régions

Si on considère l'ensemble des suivis sans tenir compte des périodes, l'écart de moyennes du nombre de passages entre le nord et le sud reste assez évident. Mais la précision des écarts-types montre aussi que c'est aussi surtout au niveau des régions où les moyennes sont les plus élevées que les écarts types sont le plus marqués et donc que les disparités sont les plus marquées au sein des régions (Figure 39).

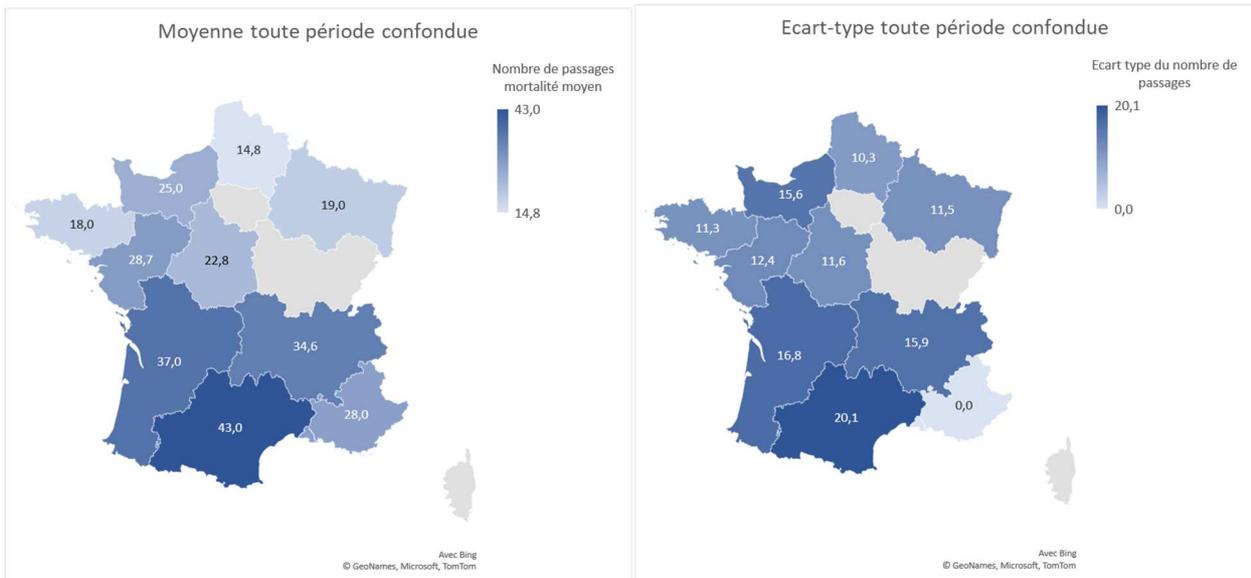


Figure 39 Répartition régionale des moyennes et écarts types de nombre de passages de suivis de la mortalité, toutes périodes confondues

➤ **Pratiques concernant le nombre de tests réalisés pour déterminer les coefficients correcteurs**

Concernant les tests à réaliser pour permettre de valider et analyser les résultats de la mortalité, c'est-à-dire le test d'efficacité de la recherche (« test de détection ») et le test de persistance des cadavres (« test de prédation »), les graphiques suivants (Figure 40) sont basés sur :

- 0 = aucun test réalisé pendant dans campagne de suivi,
- 0,5 = réalisation d'un test de prédation OU d'un test de détection
- 1 = réalisation d'un test de prédation ET d'un test de détection
- 2 = réalisation de 2 tests de prédation ET de 2 tests de détection...

On note que, là encore, les pratiques sont très diversifiées mais tendent à s'harmoniser avec le temps. Il est probable que l'évolution des prescriptions nationales à ce propos ait permis cette harmonisation avec une mise en œuvre systématique de phases de tests depuis 2018 et la généralisation de la réalisation d'au moins 2 tests par campagne de suivi.

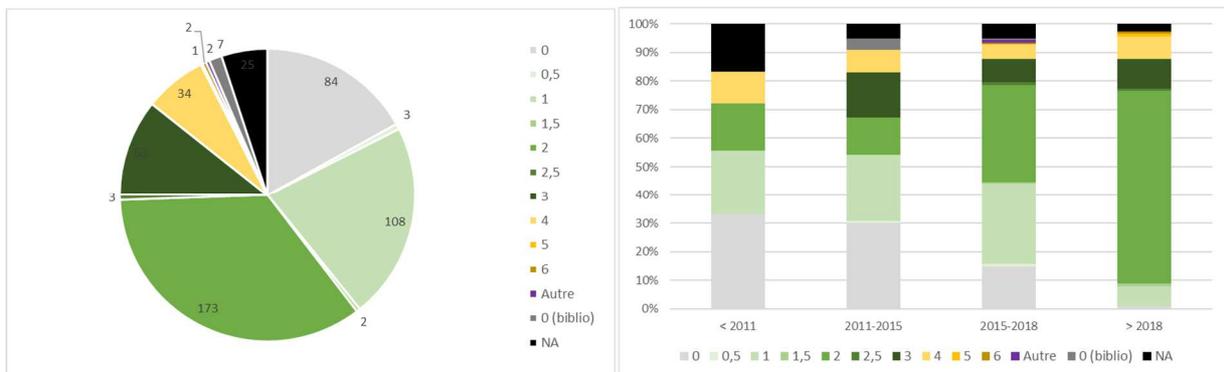


Figure 40 Graphiques des pratiques en termes de nombre d'autotests réalisés (détection / prédation) dans le cadre des suivis de la mortalité

➤ **Pratiques concernant la prise en compte de la végétation dans les suivis de la mortalité**

Concernant la prise en compte de la végétation dans les suivis de la mortalité, comme il s'agit d'un facteur d'influence important pour la détectabilité des cadavres dont la prise en compte est requise par le protocole national de suivi environnemental (MTES / DGPR/ DGALN (2018), les graphiques suivants (Figure 41) retiennent le « oui » si l'évolution de la végétation est prise en compte dans les protocoles d'autotests (typologie de la végétation préalable et dispersion ciblée des cadavres tests), et / ou dans l'analyse et l'interprétation des résultats (pondération / interprétation des résultats bruts). On note à ce niveau que **si les pratiques semblent progresser depuis la dernière version du protocole nationale (2018), elles restent encore minoritaires** dans les rapports et pourraient être plus généralisées.

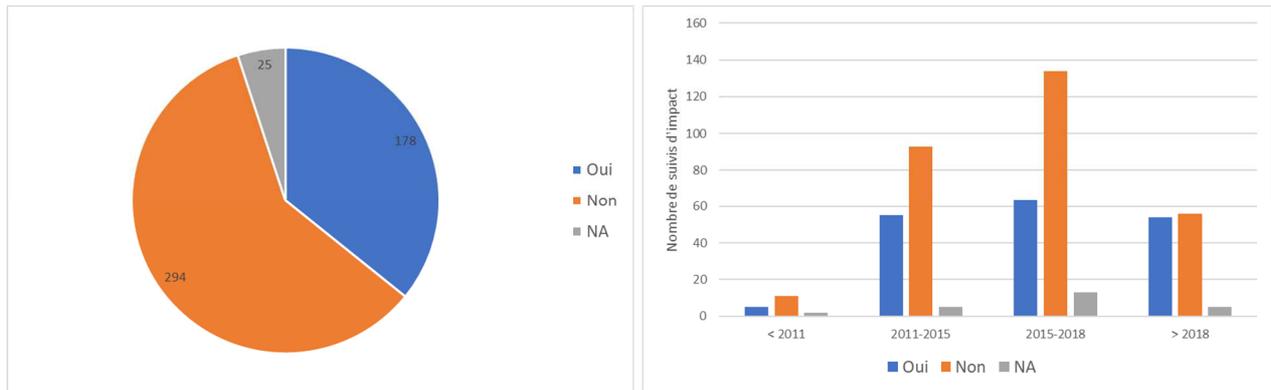


Figure 41 Graphiques des pratiques de prise en compte de la végétation dans le cadre des suivis de la mortalité

2.2.2.4.3. Pratiques d'analyse et d'interprétation des résultats des suivis de la mortalité

➤ **Pratiques concernant l'utilisation d'intervalles de confiance pour qualifier le taux de mortalité**

Au vu de l'exposition des suivis de la mortalité aux divers biais méthodologiques (Smallwood 2007), le protocole de suivi environnemental 2018 tente de cadrer l'analyse et l'interprétation des résultats d'estimation de la mortalité réelle à partir des résultats bruts. Pour ce faire, il incite l'analyste à contextualiser les résultats via le calcul d'un intervalle de confiance (« [...] Préciser l'incertitude de l'estimation de la mortalité [...] ») qui permet de caractériser la zone d'incertitude de ces résultats.

Dans les pratiques, cette **précision de l'intervalle de confiance est très peu respectée** (Figure 42). La version 2018 du protocole de suivi environnemental aura quand même fait évoluer les pratiques, mais pour **moins d'1/3 des rapports analysés**.

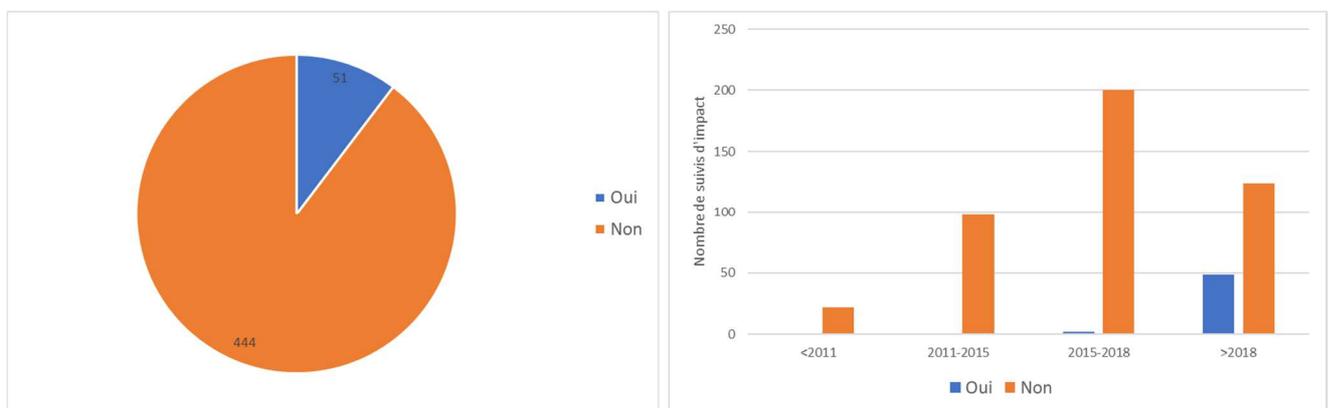


Figure 42 Graphiques des pratiques de prise en compte d'un intervalle de confiance dans l'estimation de la mortalité

➤ **Pratiques concernant la mise en perspective des résultats par comparaison avec ceux d'autres parcs, à l'échelle régionale ou nationale**

Une fois que le niveau de mortalité de chauves-souris généré par le parc éolien est estimé, il est difficile d'en interpréter ses effets sur les populations d'espèces concernées puisque ces dernières sont généralement très mal connues. A défaut, et dans l'intérêt d'une analyse des effets cumulatifs avec d'autres parcs, il a été recherché dans l'échantillon de rapports analysés, si les résultats avaient été comparés avec ceux d'autres parcs éoliens à l'échelle locale (effets cumulés), régionale ou nationale.

Les graphiques suivants (Figure 43) montrent que les **pratiques évoluent vers une meilleure prise en compte des effets cumulatifs avec le temps**. Car si globalement **seuls 42% des rapports analysés font l'effort de cette comparaison, leur proportion augmente significativement** depuis 2011. Cette prise de recul va en effet de pair avec la synthèse et le partage de l'information des impacts générés par les parcs éoliens à l'échelle régionale et nationale. Cette information est longtemps restée inaccessible, induisant une contrainte majeure vis-à-vis de cette démarche de prise de recul. Elle commence à devenir accessible dans certaines régions (ex. mise en ligne des rapports de suivis environnementaux en région Occitanie). Il est probable que la mise à disposition attendue des données de synthèse à l'échelle nationale (DEPOBIO) pourra alors plus largement améliorer les pratiques à ce niveau.

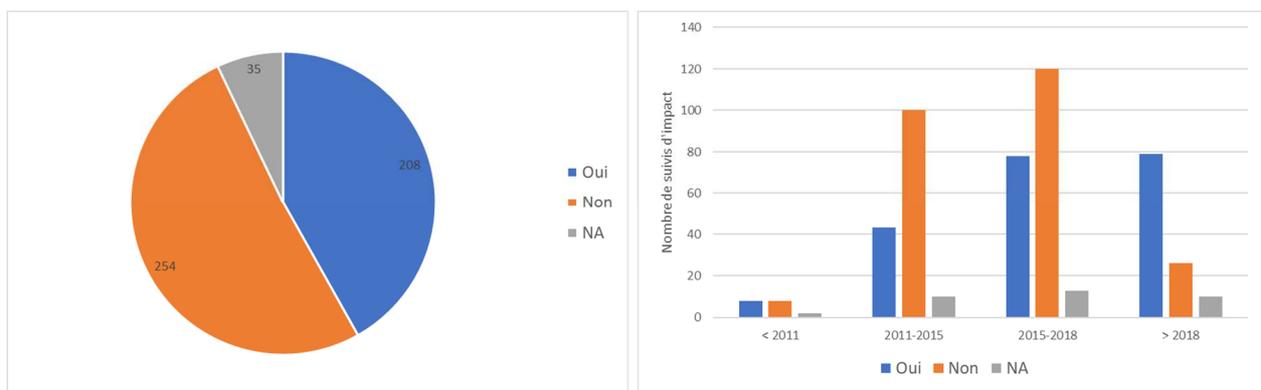


Figure 43 Graphiques des pratiques pour la prise en compte des résultats de suivis de la mortalité d'autres parcs régionaux ou nationaux pour interpréter ceux du site d'étude

A retenir de cette partie

Dans le cadre des parcs exploités, les suivis de la mortalité sont importants pour faire le constat de l'impact par mortalité et aider à prendre la décision de réguler le parc, voire (partiellement) à dimensionner la mesure.

Comme pour le suivi d'activité en hauteur, les pratiques du suivi de la mortalité **semblent globalement plutôt progresser en qualité avec le temps et l'évolution des prescriptions nationales**. On retient en effet notamment l'abandon des suivis d'extrêmement courte durée ou de très faible pression de suivi pour les cas de premier suivi de la mortalité. Depuis 2018, les très courts suivis se limitent aux cas de reconductions de suivi sur plusieurs années, avec ciblage sur un enjeu et une période identifiée. L'évolution positive des pratiques concerne aussi la qualité de la mise en œuvre des tests d'évaluation des sources de biais (taux de persistance, taux de détection, coefficient surfacique...) ou bien la prise en compte de l'évolution de la végétation comme facteurs d'influence (même si cela reste minoritaire).

Mais à contrario, le nouveau protocole a eu aussi **tendance à homogénéiser les pratiques, induisant parfois un lissage vers le bas de l'effort de prospection** dans certaines régions (réduction des extrêmes maximum). Et certaines pratiques vertueuses ont du mal à se développer (intervalle de confiance).

Les disparités régionales sont importantes avec des efforts de prospection souvent bien plus poussées au sud qu'au nord, surtout liée à des études à très fortes pressions au sud qui augmentent la moyenne, alors qu'au nord les études sont plus standardisées et souvent menées sur des modèles à moindre effort d'échantillonnage.

2.2.2.5. Comment les résultats de suivis de la mortalité et de l'activité des chauves-souris en hauteur sont-ils croisés ?

Le croisement des résultats de la mortalité des chauves-souris au sol (qui caractérisent le niveau d'impact du parc éolien et les espèces concernées), de l'activité des chauves-souris à hauteur de rotor et des conditions climatiques (qui caractérisent les conditions d'exposition au risque) est la base du processus de régulation engagé à l'échelle internationale (Arnett et al. 2010, Groupe Chiroptères de la SFEPM 2016, Behr et al. 2017, Bennett et al. 2022, Voigt et al. 2022) Il permet à la fois de prendre et justifier de la décision d'engager la mesure, puis de dimensionner et justifier le pattern de régulation. Il est donc **essentiel que les rapports de suivi environnementaux permettent une analyse croisée des résultats de suivis de la mortalité et de l'activité en hauteur**. Même si les deux types de suivis ne sont pas réalisés par les mêmes organismes, il s'agit au moins ;

- Qu'ils aient été réalisés en parallèle, c'est-à-dire sur des plages de suivi cohérentes,
- Et qu'un travail de synthèse des résultats soit présenté dans les rapports

Les cartes suivantes (Figure 44) ciblent la proportion de rapports par régions qui permettent ce croisement de résultats entre suivis de la mortalité et de l'activité en hauteur. On note là encore que les **bonnes pratiques ont évolué de façon diversifiée, probablement initiées de façon cohérente avec le développement éolien (influence des régions du sud), mais qu'elles finissent par se généraliser récemment, notamment suite à la publication de la version 2018 du protocole de suivi environnemental**.

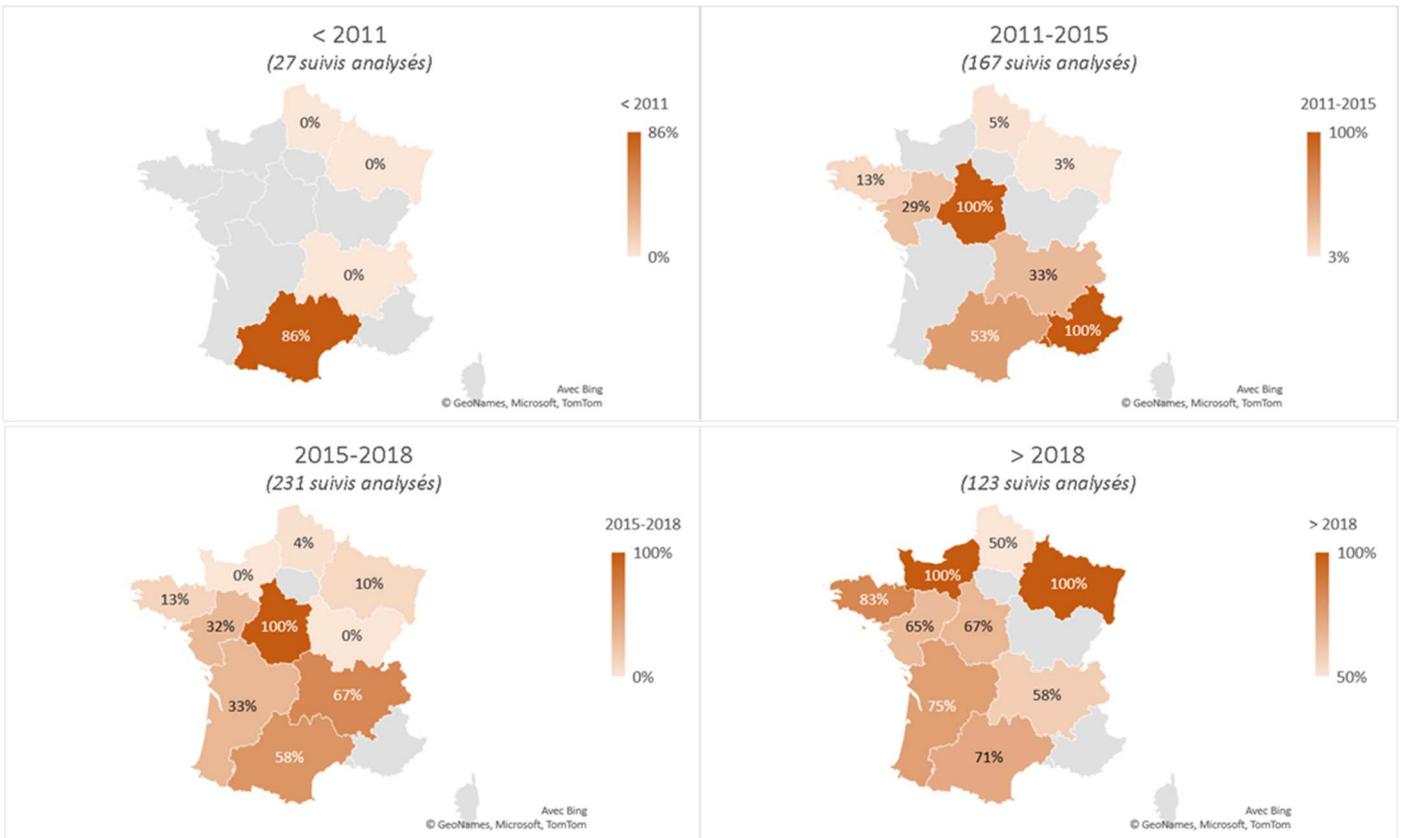


Figure 44 Evolution de la proportion de suivis croisés de l'activité en hauteur ET de la mortalité par régions

2.2.2.6. Comment la décision d'une mesure de régulation est-elle prise et pour quel mode de régulation ?

2.2.2.6.1. Rappel des prescriptions nationales

Au niveau du Guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens en vigueur (version 2020), les prescriptions pour justifier et dimensionner la mesure de régulation sont très peu détaillées, et restent finalement peu incitatives sur la mesure de régulation elle-même : « [...] *Le cas échéant et en fonction des niveaux d'impacts bruts, mesures de régulation des éoliennes en fonction de la période, de la vitesse du vent et de la température (les définir et au besoin faire une mise à jour annuelle), système de détection des chiroptères* [...] » (p. 110).

Au niveau du protocole de suivi environnemental en vigueur (version 2018), le processus de prise de décision d'engager une mesure de régulation et le processus de dimensionnement de la mesure sont peu détaillés. Les prescriptions se résument en fait surtout ;

- aux **objectifs à atteindre** :
 - [...] *analyse de l'impact du parc et l'efficacité des éventuelles mesures en place* [...]
 - [...] *(régulation notamment) et causes d'inefficacité le cas échéant.* [...]
 - [...] *Des mesures correctives visant à réduire la mortalité doivent systématiquement être proposées dès qu'un impact significatif est mesuré* [...]
 - [...] *Proposer au besoin une révision adaptée (à la hausse ou à la baisse) des mesures en place (ex. évolution du choix du plan de régulation, des paramètres ou des seuils)* [...]
 - [...] *prévoir au besoin un nouveau suivi pour en vérifier l'efficacité* [...]
- à une **liste de données à prendre en compte** pour engager le processus :
 - [...] *Pour cela, une analyse comparée de la mortalité avec les autres facteurs mesurés (suivi en activité des chiroptères, conditions météorologiques, milieux environnants, emplacements des machines...) pourra aider l'identification de mesures adaptées* [...]

Mais aucune méthode détaillée, ni seuil, n'est proposé pour aider à faire des choix pertinents, proportionnés et justifiés dans ces processus de prise de décision et de dimensionnement de la mesure de régulation.

2.2.2.6.2. Pratiques concernant la prise de décision d'engager la mesure

Au niveau des rapports d'études d'impacts de nouveaux projets ou de suivis d'impacts de parcs exploités, le choix des mesures retenues est souvent le fruit d'échanges et de négociations. L'exploitant ou le porteur de projet est en effet conseillé / orienté par son prestataire (association / bureau d'étude / consultant). Et il arrive aussi parfois que les mesures évoluent entre plusieurs versions de rapports en fonction d'échanges avec les services de l'état.

Pour ce qui concerne les études d'impacts de nouveaux projets, celles qui aboutissent sur une décision / prescription pour engager ou optimiser une mesure de régulation en faveur des chiroptères sont les plus nombreuses et concernent 71% des cas (N=100). La mesure semble se développer de façon très majoritaire depuis 2017 dans les rapports (Figure 45).

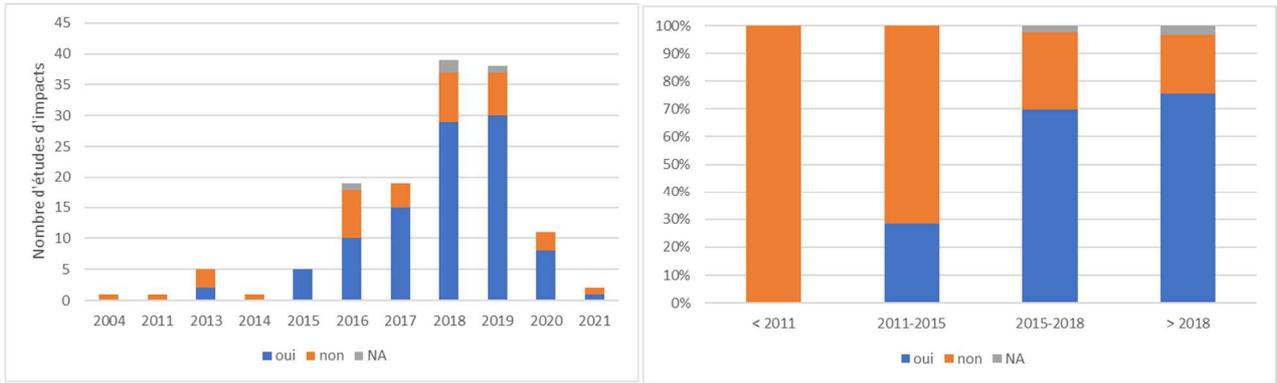


Figure 45 Evolution de la prise de décision d'engager une mesure de régulation dans les rapports d'études d'impacts de nouveaux projets

Pour l'ensemble des rapports de suivis d'impacts de parcs exploités, ceux qui aboutissent à une décision / prescription pour engager ou optimiser une mesure de régulation en faveur des chiroptères **ne concernent que 37% des cas**. Cependant l'analyse de l'évolution de ces pratiques (Figure 46) montre que la mesure de régulation a **fortement progressé dans les pratiques depuis plus de 10 ans**. La mesure n'était en effet engagée que pour 8% des cas avant 2011, et elle concerne 73% des cas depuis 2018. La plus faible proportion de rapports qui préconisent une régulation dans le cadre de suivis d'impacts comparée aux études d'impacts tient probablement au fait que le jeu de rapports analysés pour ces dernières est plus récent que celui des suivis d'impacts.

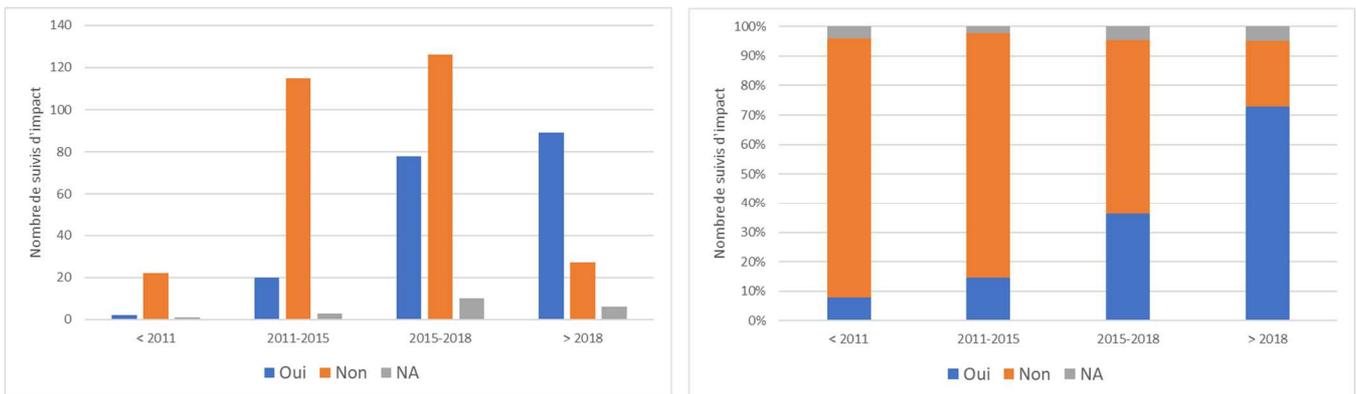


Figure 46 Evolution de la prise de décision d'engager une mesure de régulation dans les rapports de suivis d'impacts de parcs exploités

Les raisons de cette progression ne sont probablement pas uniquement liées à l'évolution des prescriptions nationales, d'autant que nous avons vu que celles-ci restent vagues dans le processus de prise de décision. On peut penser qu'elle résulte d'une **prise de conscience grandissante des impacts éoliens sur les populations de chiroptères** (cf. chapitre 1.3 page 14). Mais elle aura aussi probablement été favorisée par le partage d'expériences de chacun, qu'il s'agisse des aspects techniques (sources de données, choix des seuils, types de patterns, ...) ou financiers (retours positifs sur l'impact limité de la mesure sur la perte de production).

2.2.2.6.3. Pratiques concernant les modes de régulation retenus

➤ Dans le cadre des études d'impacts de nouveaux projets

✓ Modes de régulation retenus

Dans le cadre des études d'impacts de nouveaux projets analysées (N=141), lorsqu'une mesure de régulation est retenue (N=100), les deux modes de régulations privilégiés sont le **mode conventionnel** et le **mode prédictif**, dans des proportions comparables. Le mode prédictif tend toutefois à progresser ces dernières années (Figure 47).

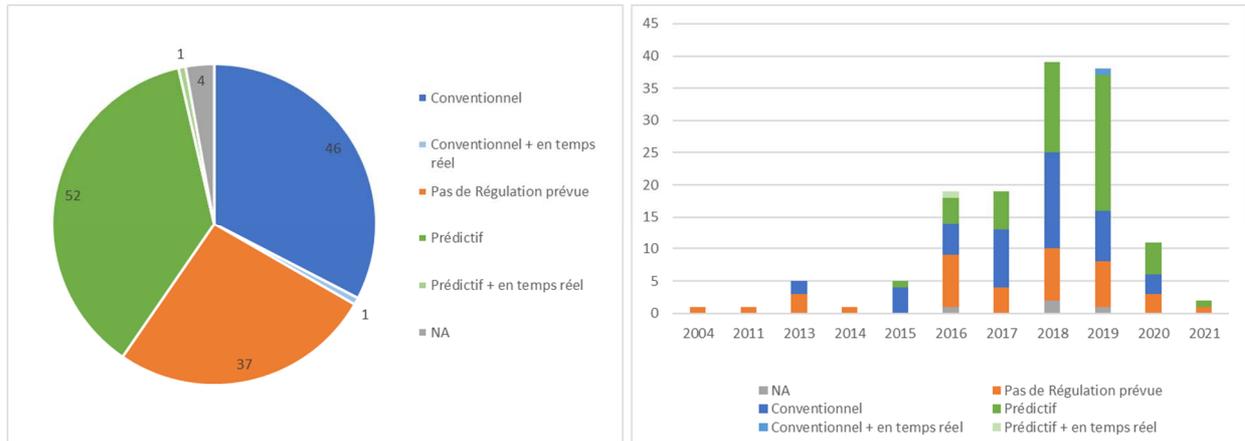


Figure 47 Proportion et évolution des modes de régulation retenus dans le cadre d'études d'impacts de nouveaux projets

✓ Effet du suivi d'activité en hauteur sur les modes de régulation retenus

Si on croise le mode de régulation retenu dans les études d'impacts avec l'existence ou non d'un suivi d'activité en hauteur et en continu et avec le type de support de suivi utilisé, on note **des incohérences sur la pertinence du mode de régulation retenu** :

- **Pour les cas où il a été décidé de pas retenir de mesure de régulation**, 98 % des études ne bénéficient pas de suivi d'activité adapté à la fois à hauteur de rotor et en continu (mât de mesure, éolienne). Il faut toutefois nuancer ces résultats en tenant compte du fait l'ensemble de l'échantillon est pris en compte ici alors que les pratiques ont évolué dans le temps. Néanmoins, de façon générale, cette décision de ne pas réguler ne repose donc sur aucun élément fiable aussi bien en faveur de la protection des chauves-souris qu'en faveur de l'investisseur du projet. En effet sans qualification de la situation à risque à hauteur de rotor, cela signifie que le processus de maîtrise des risques de mortalités des chauves-souris ne pourra être géré qu'en phase d'exploitation, avec une prise de risque non négligeable pour les chauves-souris, au moins pour la première année d'exploitation du parc (le temps de définir une mesure proportionnée), mais aussi pour le projet (risque de mesure de régulation avec impact sous-évalué sur l'équilibre financier du parc).
- **Lorsqu'une mesure de régulation prédictive est retenue**, elle devrait être logiquement dimensionnée sur la base d'une connaissance préalable des conditions de risques du site et que ces dernières ne peuvent être perçues que via un suivi de l'activité à hauteur de rotors et en continu (sur l'ensemble de la période d'activité des chauves-souris). Or le graphique suivant montre **qu'une partie des mesures de régulation prédictive (20%) a été retenue sur la base de suivis par ballons sonde ou sur canopée qui ne permettent pas de garantir soit le caractère continu du suivi, soit son positionnement à hauteur de rotor**. On note même que dans 20 % des cas où la mesure de régulation prédictive est retenue, l'étude d'impact ne bénéficie d'aucun suivi d'activité en hauteur.

Pour autant, les graphiques (Figure 48) montrent quand même logiquement que le mode de régulation prédictif correspond bien à celui pour lequel l'exploitation d'un suivi en continu et en hauteur (mât de

mesure) est la plus importante (60%), et donc la plus à même de qualifier les conditions de risques. Le **mode de régulation prédictif** semblant progresser dans le temps, cette évolution peut témoigner d'une prise en compte de plus en plus pertinente de l'activité à risque des chauves-souris dans les nouveaux projets.

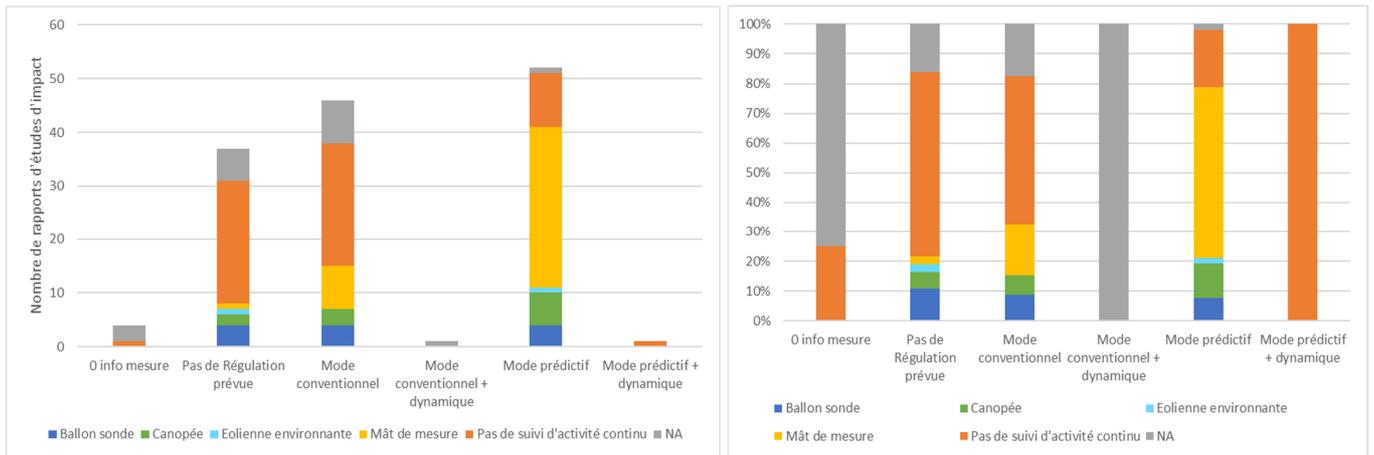


Figure 48 Liens entre le mode de régulation retenu dans les études d'impacts et la pertinence du type de suivi acoustique engagé

➤ Dans le cadre des suivis d'impacts de parcs en activité

✓ Modes de régulation retenus

Dans le cadre des suivis d'impacts de parcs exploités (N=559), lorsqu'une mesure de régulation est préconisée ou testée (N=209, soit 37% des cas), c'est toujours le **mode prédictif** qui prédomine (Figure 49). La proportion de mode de régulation progresse dans le temps et notamment suite à la version 2018 du protocole de suivi environnemental.

Pour 9% des cas, le mode de régulation est noté « Autre ». Ces cas concernent ;

- Soit des rapports qui concluent sur la nécessité de mettre en place une mesure mais sans en préciser du tout les modalités du pattern de régulation,
- Soit des rapports qui préconisent un pattern mais sans justification, c'est-à-dire sans justifier d'un choix de pattern déjà engagé à l'échelle locale ou régionale (mode conventionnel préventif), et sans non plus se référer à une analyse circonstanciée des conditions de risques (mode prédictif).

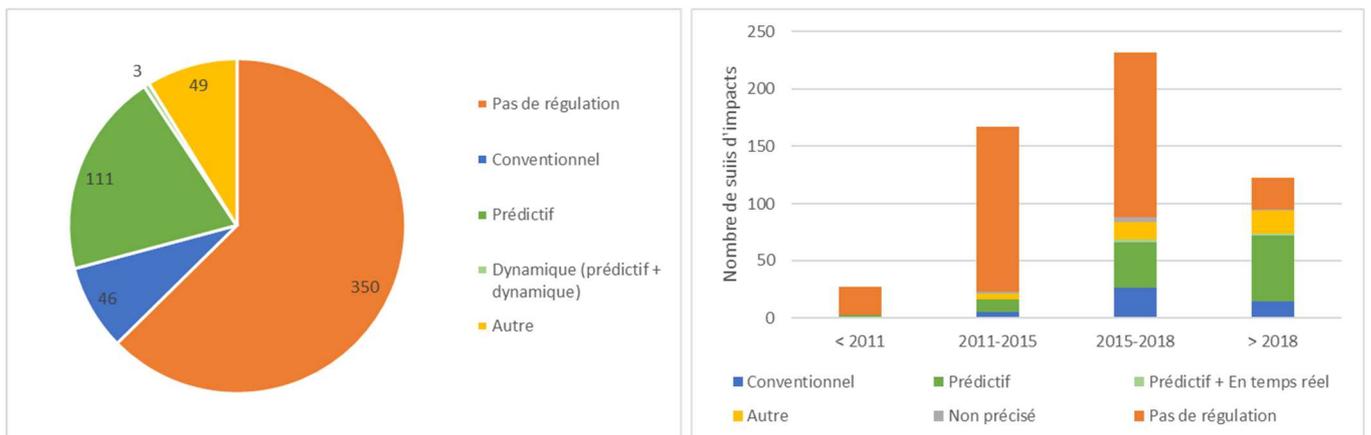


Figure 49 Proportion et évolution des modes de régulation retenus dans le cadre de suivis d'impacts de parcs exploités

✓ Effet du suivi d'activité en hauteur sur les modes de régulation retenus

Si on croise le mode de régulation retenu dans les suivis d'impact avec l'existence ou non d'un suivi en hauteur et en continu (depuis une nacelle d'éolienne ou un mât de mesure), on note à nouveau certaines incohérences de traitement dans les rapports (Figure 50). Là encore, ces résultats sont à prendre avec précautions dès lors que tout l'échantillon est considéré de façon globale sans tenir compte de l'évolution des pratiques ;

- Lorsque les suivis d'impacts ne bénéficient pas d'étude d'activité des chauves-souris en hauteur (2/3 des cas), ils aboutissent pour 80% d'entre eux à l'absence de décision d'engager mesure de régulation. Dans ce cas-là, la décision repose alors exclusivement sur les résultats du suivi de la mortalité.

Lorsque le suivi ne bénéficie pas d'étude de l'étude d'activité en hauteur et qu'il aboutit à la décision de réguler, le mode de régulation conventionnel devrait être le plus logique car les conditions de risques sont mal connues. Pourtant on note qu'il ne représente pourtant que 1/3 des cas étudiés. Autrement dit, **en l'absence de suivi d'activité en hauteur, 2/3 des patterns de régulation sont quand même retenus de façon prédictive, c'est-à-dire malgré l'absence de prédiction fondée et argumentée sur les conditions de risque.**

- Lorsque les suivis d'impacts bénéficient de l'étude d'activité des chauves-souris en hauteur, la décision de ne pas réguler ne représente plus que 30% des cas. Autrement dit, il semble que le suivi en hauteur permette une perception du niveau de risque différenciée que celle obtenue uniquement via le suivi de la mortalité.

Lorsque le suivi bénéficie d'une étude d'activité en hauteur et qu'il est décidé d'engager une mesure de régulation, on note alors **le développement logique d'une plus grande proportion du mode de régulation prédictif**, puisque le suivi en hauteur aura facilité la démarche de prédiction des conditions de risques.

Finalement, dans le cadre d'un suivi d'impact, en l'absence d'étude d'activité en hauteur, la décision de réguler ou non et le dimensionnement du pattern de régulation ne peuvent être retenus que sur la base du suivi de la mortalité. Cela souligne alors l'importance de la qualité des suivis de mortalité et de la maîtrise des biais inhérents pour que la décision d'absence de mesure soit pertinente.

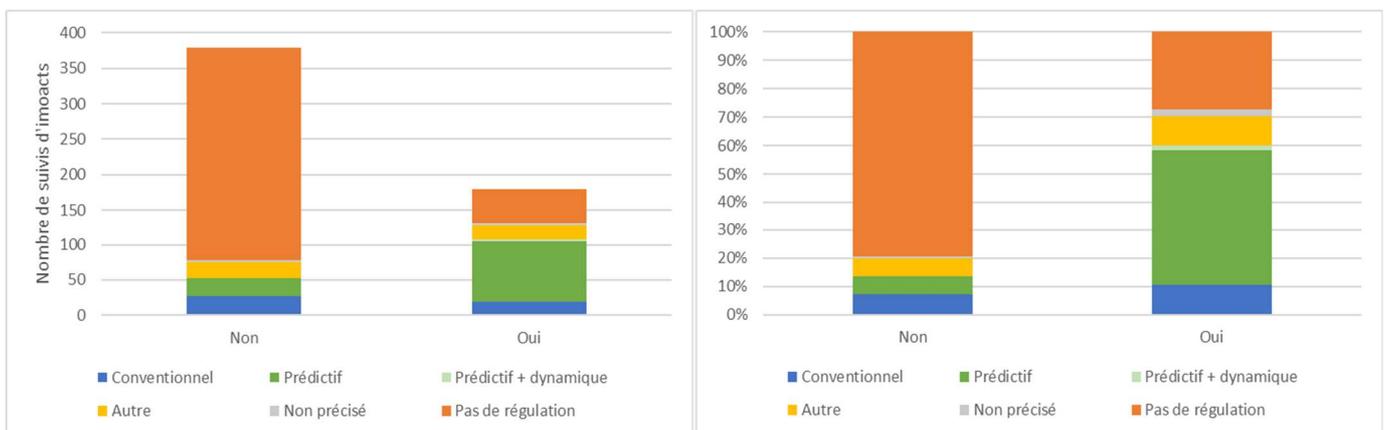


Figure 50 Modes de régulation retenus (nombre et proportion) dans les suivis d'impacts selon présence ou absence qu'une étude d'activité en hauteur et en continu

A retenir de cette partie

Concernant la phase de **prise de décision d'engager une mesure de régulation**, elle est en forte progression **générale ces dernières années, avec plus de 70% des études d'impacts et de suivis d'impacts** qui 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**. C'est notamment le cas de modes de régulation prédictif qui sont retenus malgré l'absence de suivis 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 qu'elles n'intègrent pas toujours l'évolution des pratiques dans le temps.

2.2.2.7. Quelles sont les pratiques du dimensionnement de la régulation (quel pattern est retenu) ?

2.2.2.7.1. Dimensionnement dans le cadre des études d'impacts de projets éoliens

➤ Nombre et types de paramètres du pattern de régulation

Lorsqu'une mesure de régulation est retenue dans l'échantillon d'études (N=100), le **nombre de paramètres climatiques et / ou temporels utilisés** pour dimensionner le pattern de régulation varie de 1 à 6.

Il s'agit surtout :

- Du **seuil de vitesse de vent** en dessous duquel les éoliennes sont arrêtées (pales mises en drapeau). Plus ce seuil est élevé et plus la mesure est conservatrice.
- Du **seuil de température** au-delà duquel les éoliennes sont arrêtées. Plus ce seuil est bas et plus la mesure est conservatrice.
- De la **période d'activation** de la mesure,
- De la **plage horaire d'activation** de la mesure,

Ces quatre premiers paramètres sont quasi-systématiquement précisés (99% des cas).

On peut toutefois trouver deux autres paramètres de façon plus irrégulière ;

- Des précisions sur les **conditions de précipitations** pour lesquelles la mesure est désactivée (60% des cas),
- Des **éoliennes concernées** par la mesure, si toutes ne sont pas, ou bien une distinction de la mesure par éoliennes (50% des cas).

Enfin, deux autres paramètres sont retenus de façon anecdotique (1%), la direction du vent et la présence de brouillard.

➤ Période d'activation

En ce qui concerne la période d'activation de la mesure, dans **la plupart des cas, elle est retenue pour débuter au 1^{er} avril et pour s'arrêter au 31 octobre** (Figure 51).

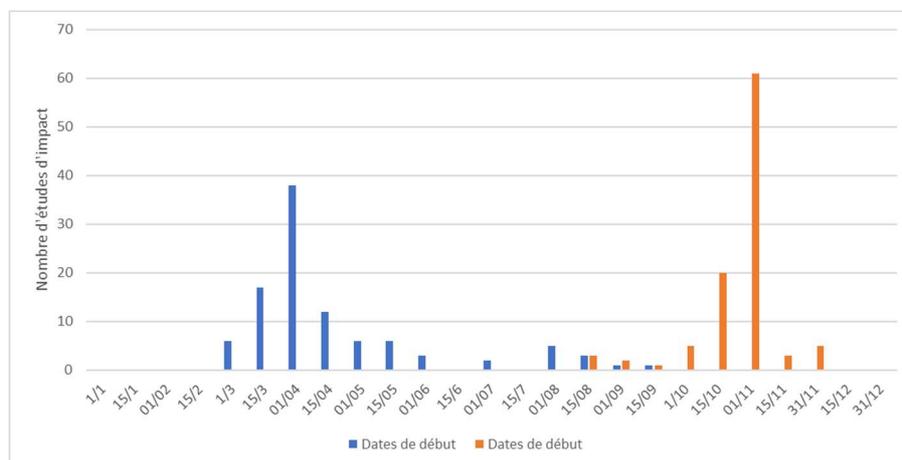


Figure 51 Mois de début (en bleu) et de fin (en orange) de période d'activité des patterns de régulation retenus par les études d'impacts de projets éoliens

➤ Vitesse de vent

En ce qui concerne le seuil de vitesse de vent retenu sous lequel les éoliennes doivent être arrêtées, il **varie de 2 à 9 m/s** dans les rapports analysés (Figure 52).

Pour **80% des études**, ce seuil est retenu de façon uniforme pour l'ensemble de la période de régulation engagée. Dans ce cas, le seuil varie de 2 à 7,1 m/s, mais ce sont **surtout les seuils de 5 et 6 m/s qui sont les plus utilisés** (22 et 41% des cas).

20% des études retiennent des patterns dits « élaborés » c'est-à-dire soit décomposés par sous périodes, avec soit des seuils évoluant entre chaque sous période, soit différenciés par éoliennes ou groupes d'éoliennes, soit les deux. Les seuils de **vitesse de vent évoluent alors entre 3 et 9m/s pour ces patterns élaborés**. Les patterns qui retiennent les seuils les plus élevés de 8 et 9 m/s ne sont retenus que pour 4% des études analysées. Et ces seuils ne sont utilisés que dans le cadre de patterns élaborés, pour des sous-périodes d'activité.

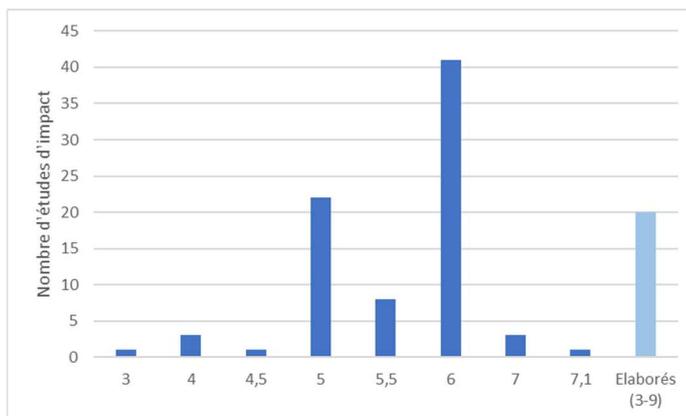


Figure 52 Seuils de vitesse de vent (m/s) exploités dans les patterns de régulation retenus par les études d'impacts de projets éoliens

➤ Température

En ce qui concerne le seuil de température retenu au-dessus duquel les éoliennes doivent être arrêtées, il **varie de 5 à 15°C** dans les rapports analysés (Figure 53).

Pour **80% des études**, ce seuil est retenu de façon uniforme pour l'ensemble de la période de régulation engagée. Dans ce cas, le seuil varie de 7 à 15°C, mais c'est **surtout le seuil de 10°C qui est le plus utilisé** (34% des cas).

20% des études retiennent des patterns dits « élaborés » c'est-à-dire soit décomposés par sous périodes, avec des seuils évoluant entre chaque sous période, soit différenciés par éoliennes ou groupes d'éoliennes, soit les deux. Les seuils de température **évoluent alors entre 5 et 13 °C** pour ces patterns élaborés.

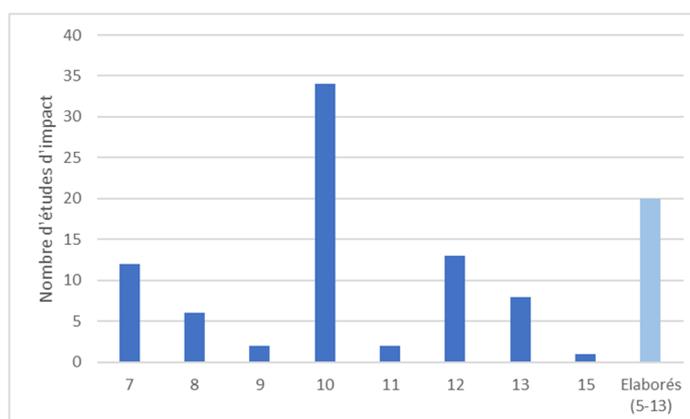


Figure 53 Seuils de température (°C) exploités dans les patterns de régulation retenus par les études d'impacts de projets éoliens

Dans de rares cas (4%), un seuil de température maximum est aussi précisé au-delà duquel les éoliennes peuvent être réactivées. Dans ces cas, le seuil varie de 18 à 25°C.

Pour les autres paramètres, les modalités d'exploitation seront plus détaillées pour les rapports de suivis d'impacts dont l'échantillon est bien plus représentatif des pratiques.

2.2.2.7.2. Dimensionnement dans le cadre de suivis d'impacts de parcs en activité

➤ Stade des suivis d'impact vis-à-vis du processus de régulation

Dans le cadre de suivis d'impacts, les campagnes de suivi sont distinguées selon leur stade dans le processus de régulation, c'est-à-dire entre la phase de dimensionnement, la mise en œuvre et la phase de validation/ optimisation ;

- **Régulation en projet** : suivi réalisé en amont de la mise en œuvre d'une mesure de régulation, pour parc éolien en activité, mais non encore régulé. Le suivi vise alors à s'interroger sur la nécessité de la mise en œuvre et le dimensionnement de la mesure,
- **1^{er} test de régulation** : première campagne de suivi pour le parc régulé. Le suivi vise à contrôler l'impact et les conditions de risques et évaluer l'efficacité du 1^{er} pattern de régulation retenu.
- **2^{eme} test de régulation** : deuxième campagne de suivi pour le parc régulé. Le suivi vise à contrôler l'impact et les conditions de risques et évaluer l'efficacité de la nouvelle version du pattern de régulation.
- **3^{eme} test de régulation** : troisième campagne de suivi pour le parc régulé. Le suivi vise à contrôler l'impact et les conditions de risques et évaluer l'efficacité de la nouvelle version du pattern de régulation.
- **4^{eme} test de régulation** : quatrième campagne de suivi pour le parc régulé. Le suivi vise à contrôler l'impact et les conditions de risques et évaluer l'efficacité de la nouvelle version du pattern de régulation.
- **Autre** : dans cette catégorie, soit les rapports ne précisent pas ces informations, soit il s'agit de suivis particuliers (suivi engagé pour tester l'effet de la régulation sur la mortalité des oiseaux migrateurs nocturnes, suivi engagé pour test expérimental...).

Avec la progression du développement éolien et des suivis réalisés, on note logiquement que la proportion de parcs éoliens en activité et non régulés diminue régulièrement (Figure 54). **Les types de suivis évoluent donc de plus en plus vers des suivis de test interannuels des mesures.** 30% des rapports concernent de fait des suivis de première année de régulation. Les campagnes de suivi menées en deuxième, troisième et quatrième année de test sont bien moins nombreuses, mais représentent quand même 19% des cas en tout et progressent dans le temps. Cela témoigne parfois d'une certaine inertie interannuelle avant d'aboutir au pattern de régulation le plus adapté à chaque site.

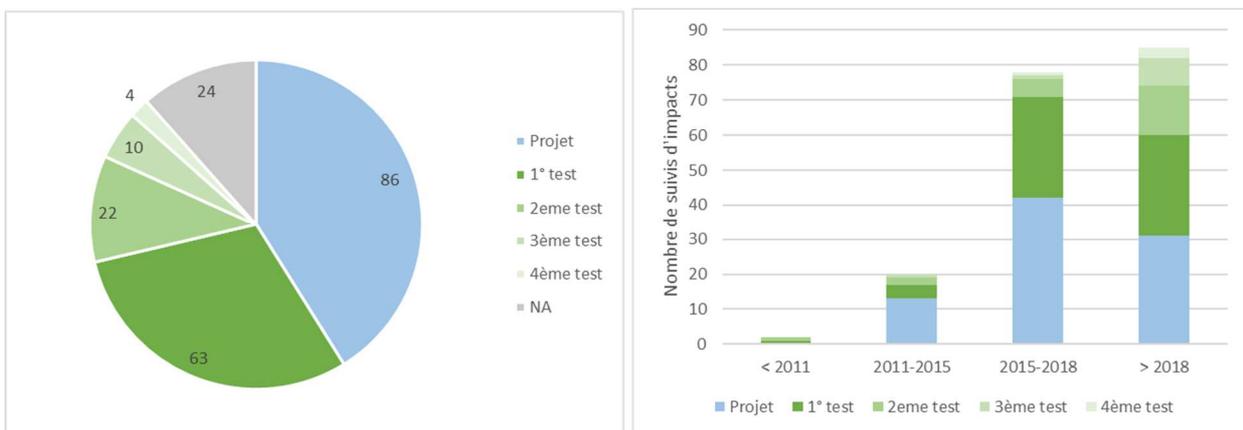


Figure 54 Typologie (proportion et évolution) des suivis d'impacts dans la chronologie de mise en œuvre et de validation / optimisation de la mesure de régulation

➤ Cohérence de régulation entre deux suivis interannuels

Pour les rapports de suivi de parcs qui ont fait l'objet de plusieurs campagnes de suivis successifs (c'est-à-dire entre l'étude d'impact et la première campagne de suivi, ou bien entre plusieurs campagnes de suivis, N=115), il a été recherché si le pattern de régulation qui avait été retenu initialement est bien le même que celui qui a été implanté et testé au cours des campagnes suivantes.

Pour les rapports où il a été possible de retrouver cette information (N=57), **30% seulement présentent effectivement le même pattern** (Figure 55). Les différences peuvent s'expliquer ;

- Soit par une **phase de renégociation intermédiaire** avec les services instructeurs suite à la rédaction du rapport de suivi,
- Soit par des **difficultés techniques d'implémentation** du pattern au niveau du parc
- Soit encore une **évolution du choix du pattern de régulation** à l'initiative de l'exploitant entre les deux campagnes de suivis.

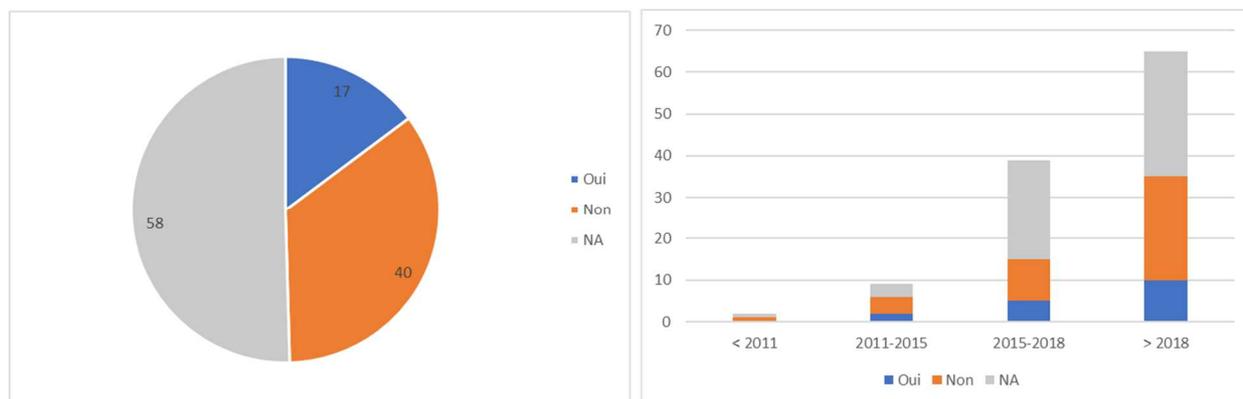


Figure 55 Proportion et nombre de patterns de régulation identiques ou différents entre deux campagnes de suivi interannuelles

➤ Nombre et types de paramètres du pattern de régulation

Les **paramètres du pattern de régulation retenus dans le cadre des suivis d'impacts éoliens sont les mêmes que ceux présentés précédemment dans le cadre des études d'impact** de nouveaux projets.

Si on tient compte des cinq principaux paramètres (vitesse de vent, température, plage horaire, période d'activation, précipitations), la plupart des rapports analysés tiennent compte d'au moins trois à quatre d'entre eux (vitesse de vent, température, période d'activation, plage horaire) et cela **reste assez constant au fil du temps** (Figure 56).

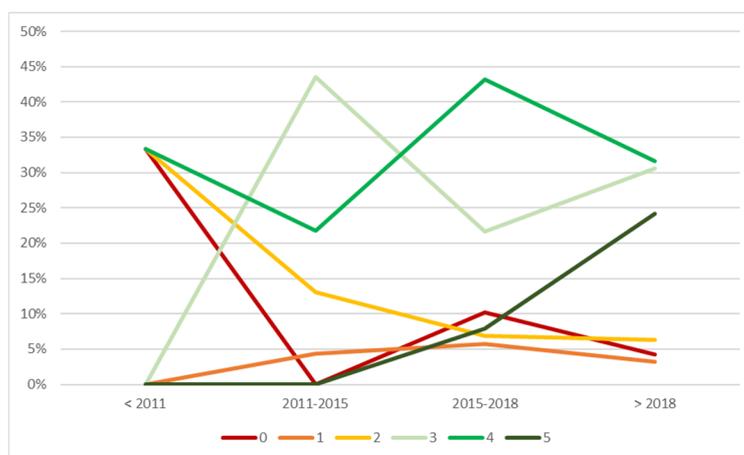


Figure 56 Evolution de la proportion du nombre de paramètres présentés dans les patterns de régulation des rapports de suivis d'impacts analysés

➤ Période d'activation

En ce qui concerne la période d'activation de la mesure, elle s'étale **le plus souvent entre la mi-mai et fin octobre** (Figure 57). C'est assez comparable avec les mois de début et de fin de régulation retenus dans le cadre des études d'impacts (cf. Figure 51). On note toutefois que le début de la période d'activation est légèrement plus tardif dans le cadre des rapports de suivis d'impacts que dans le cadre des études d'impacts. C'est probablement dû au fait que les suivis pluriannuels soient plus ciblés sur les périodes d'impacts constatés les années passées.

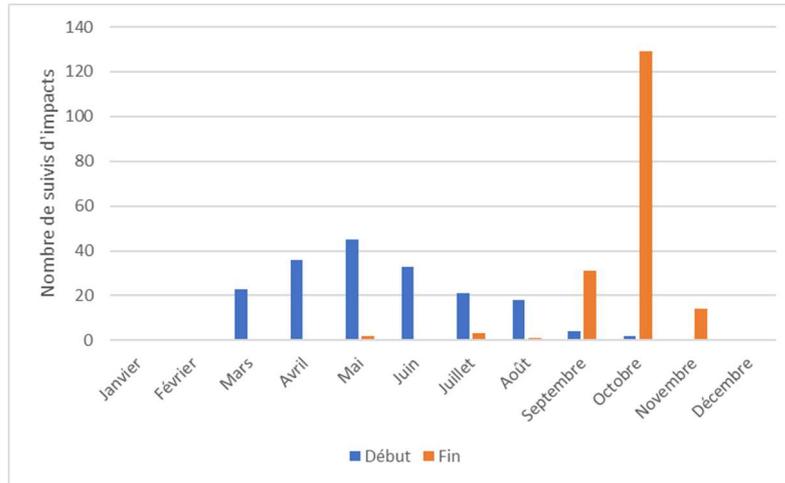


Figure 57 Mois de début (en bleu) et de fin (en orange) de période d'activité des patterns de régulation retenus par les suivis d'impacts de parcs éoliens

➤ Durée d'activation

La durée d'activation de la mesure est en moyenne de 5,2 mois (

Figure 58). Cette moyenne a régulièrement **tendance à progresser avec le temps** et la précision du cadre des prescriptions nationales. Les écarts types restent importants (1,1 à 2,2 mois), mais ont aussi tendance à réduire avec le temps. La mesure retenue semble donc **de plus en plus conservatrice concernant sa durée d'activation**.

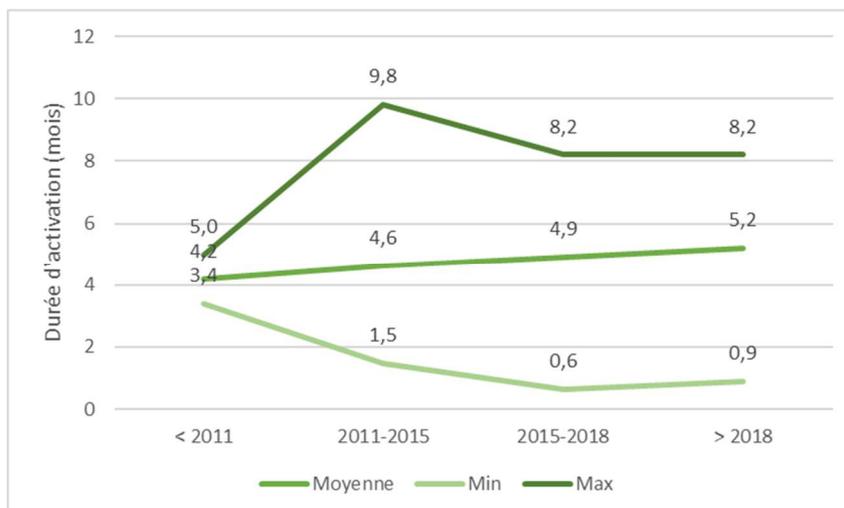


Figure 58 Evolution dans le temps de la durée (mois) de la mesure de régulation retenue par les suivis d'impacts de parcs éoliens

Pour apprécier finement l'évolution de la période d'activation de la mesure en fonction de l'évolution des prescriptions nationales, le graphique suivant (Figure 59) se base sur le critère de vitesse de vent qui est systématiquement utilisé dans les patterns retenus. Il confirme que la période a tendance à progresser au fil du temps, de 5 à 9,5 mois dans les cas les plus extrêmes. **C'est surtout sur la date de début d'activation que l'évolution est à la fois la plus marquée dans le temps et la plus variable entre les rapports** de suivis d'impacts. Avant 2015, le début de la régulation était fixé au 15 juin pour plus de 50% des rapports. Après

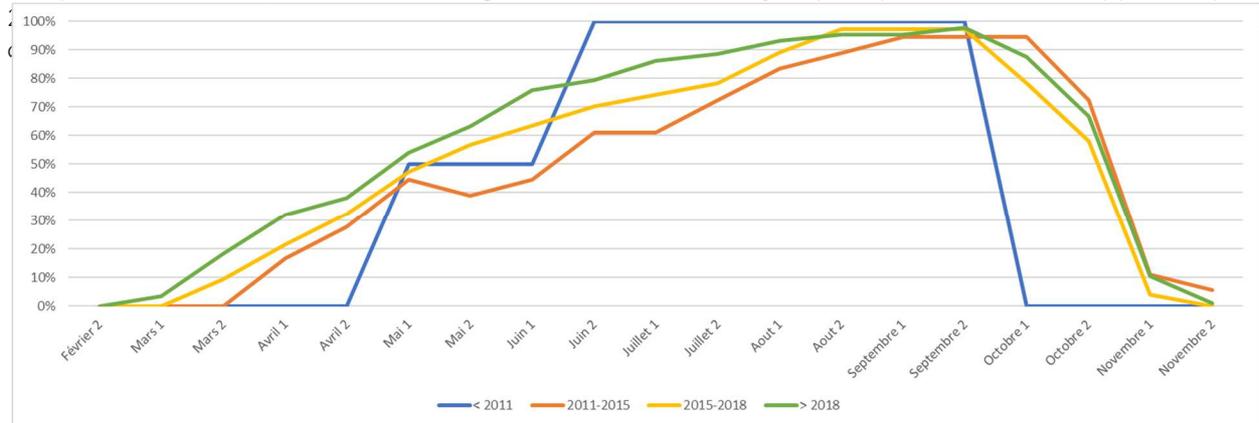


Figure 59 Principale période d'activation de la mesure de régulation retenue dans les rapports de suivis d'activité
Evolution des proportions de rapports qui retiennent une mesure par demi-mois de l'année

➤ Décomposition saisonnière / phénologique

Tout comme pour les mesures retenues dans les études d'impacts, une partie des rapports de suivis d'impacts retient des patterns de régulation « élaborés », c'est à dire **décomposés par sous-périodes saisonnières** (et donc phénologies). Parmi les rapports de suivis d'impacts qui testent ou préconisent une mesure de régulation (N=209), **seuls 31% retiennent ce type de décomposition saisonnière** (Figure 60). Pour aborder cette approche saisonnière de la mesure, il s'agit idéalement que l'analyse puisse bénéficier du suivi d'activité en hauteur sur toute la période d'activité pour réellement juger de l'évolution saisonnière des types et conditions de risques (évolution saisonnière du cortège d'espèces, évolution saisonnière du niveau d'activité, évolution saisonnière des types de comportements de vols...).

On note que cette proportion de **patterns décomposés par saisons à tendance à progresser avec le temps** (26% avant 2015, 39% après 2018). Sur le principe, cette décomposition saisonnière est sensée affiner la mesure vers l'optimisation du compromis entre la protection des espèces et la maîtrise de la production d'énergie. C'est une démarche rendue possible par l'amélioration progressive de la perception des risques d'impacts, grâce notamment au développement de l'étude d'activité des chauves-souris en hauteur depuis 2018 (cf. graphique de la Figure 78).

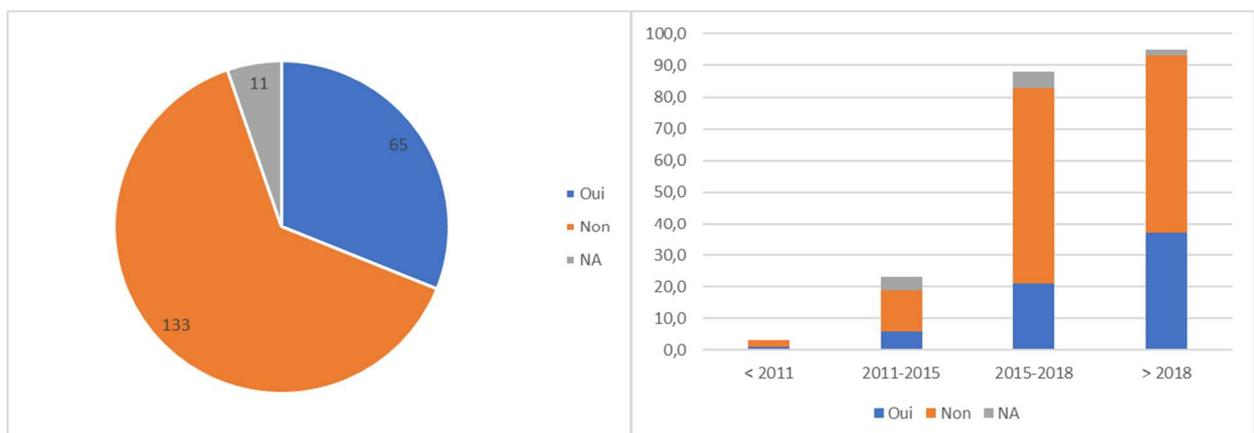


Figure 60 Proportion et nombre de patterns de régulation décomposés par sous-périodes (saisons) dans les rapports de suivis d'impacts

Sur le plan géographique, on note que ce sont surtout dans les régions où le développement éolien est le plus précoce que cette pratique de décomposition saisonnière du pattern de régulation est la plus marquée (Figure 61). Cela confirme l'idée selon laquelle l'évolution des pratiques nécessite du temps.

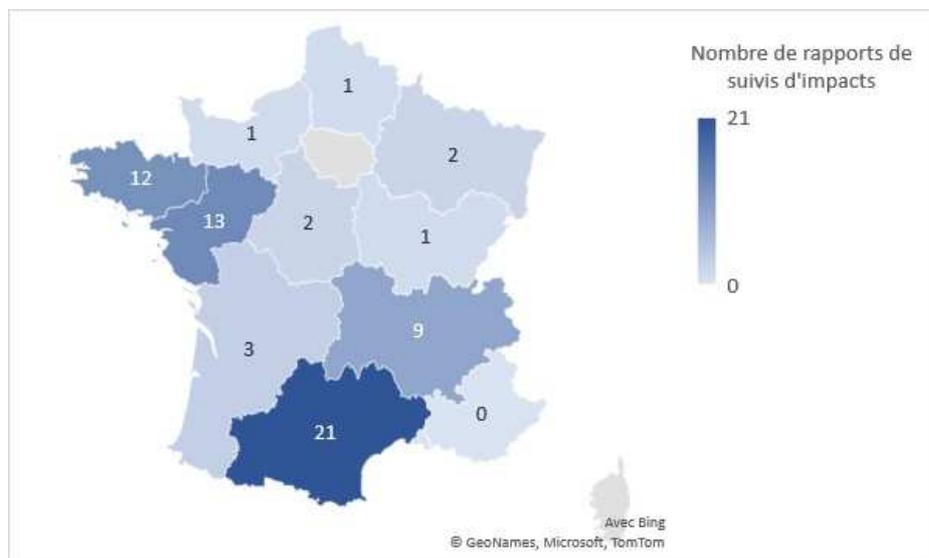


Figure 61 Répartition régionale des rapports de suivis d'impacts qui traitent d'un pattern de régulation décomposés par sous-périodes (saisons)

➤ Plage horaire d'activation

Pour ce qui concerne la plage horaire d'activation (

Figure 62), elle est largement précisée dans les patterns de régulation retenus par les rapports de suivis d'impacts (82%). Elle l'a d'ailleurs toujours été largement précisée par le passé et la tendance est encore positive.

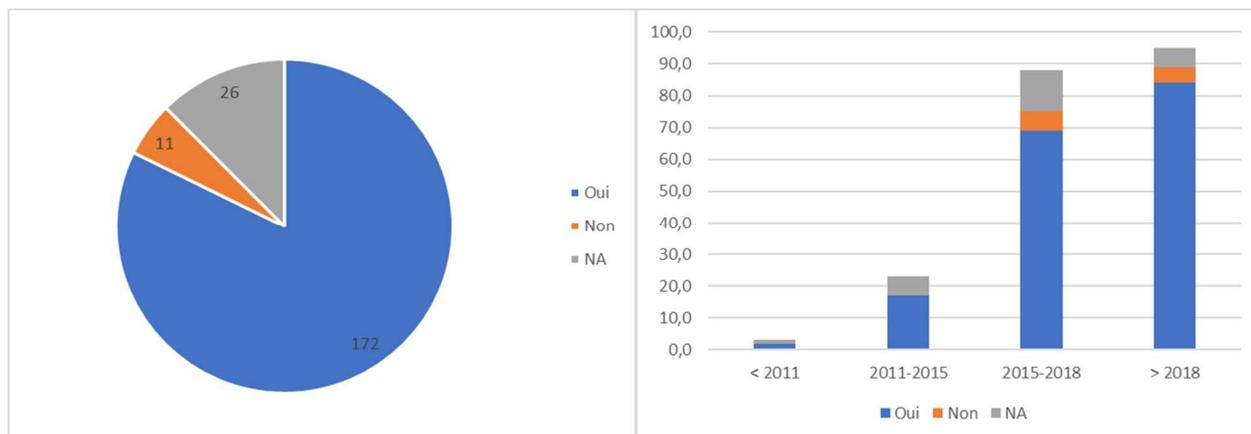


Figure 62 Proportion et nombre de patterns de régulation avec détail de la plage horaire d'activation dans les rapports de suivis d'impacts

➤ Vitesse de vent

En ce qui concerne le seuil de vitesse de vent retenu sous lequel les éoliennes doivent être arrêtées (Figure 63), c'est à nouveau le principal paramètre précisé dans les patterns de régulation des rapports de suivis d'impacts (87%).

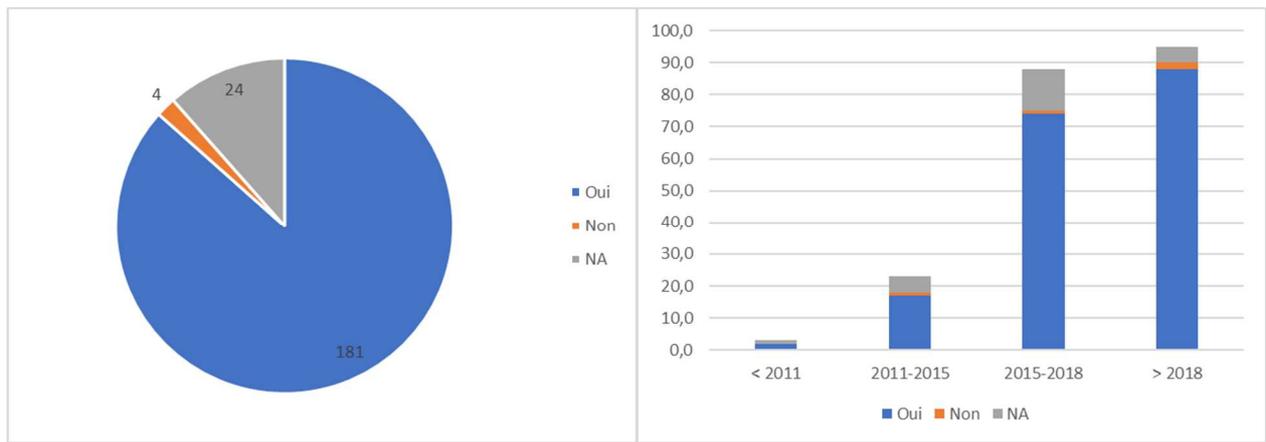


Figure 63 Proportion et nombre de patterns de régulation avec détail de la plage horaire d'activation dans les rapports de suivis d'impacts

Le seuil **varie de 2 à 8 m/s** dans les rapports analysés, comme c'était le cas pour les rapports d'études d'impacts.

Pour caractériser aussi finement que possible le seuil le plus souvent exploité, en prenant notamment en compte les patterns de régulation décomposés par saisons / phénologies, nous avons compté le nombre de fois où la vitesse de vent est utilisée par unités de 0,5 m/s (ex. si pour le même rapport une vitesse de vent de 4 m/s est utilisée sur une période et 5,5 sur une autre, alors on comptabilisera une fois 4 et une fois 5,5 m/s).

De façon générale, les **seuils les plus utilisés sont ceux de 5 à 6 m/s** comme c'était aussi le cas pour les rapports d'études d'impacts. Cela représente 63% des cas.

Sur le plan temporel (Figure 64), ces principaux seuils semblent utilisés sans évolution sensible. On pourrait noter une **légère évolution plutôt conservatrice vers le seuil de 6 m/s** privilégié sur celui de 5 m/s avec le temps. Il est possible que cela soit lié à l'évolution des prescriptions nationales et notamment le développement d'une proportion importante de patterns à mode de **régulation conventionnel dont le seuil de 6 m/s est prépondérant**.

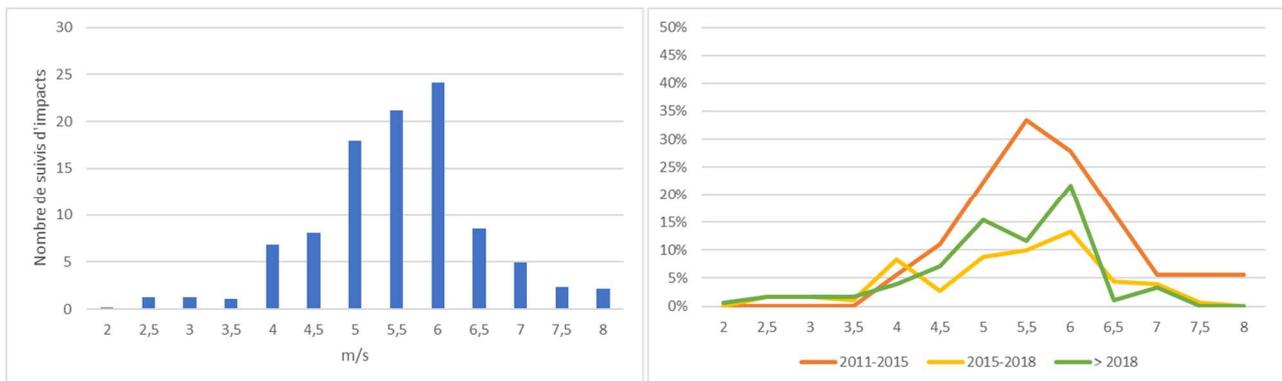


Figure 64 Seuil de vitesse de vent le plus utilisé et évolution temporelle dans les rapports de suivis d'impacts

En analysant plus précisément les seuils de vitesse de vent retenus par demi-mois (Figure 65), on note que la majorité des rapports ciblent **surtout la période de fin d'été -début automne c'est-à-dire de mi-juillet/début août à fin septembre/mi-octobre** pour les seuils privilégiés de 5 à 6 m/s. Les seuils plus bas de 4 ou 4,5 m/s sont plutôt exploités pour la période de fin de printemps-début d'été (mi-mai – juillet).

	Jan-1	Jan-2	Fev-1	Fev-2	Mar-1	Mar-2	Avr-1	Avr-2	Mai-1	Mai-2	Jun-1	Jun-2	Jul-1	Jul-2	Aou-1	Aou-2	Sep-1	Sep-2	Oct-1	Oct-2	Nov-1	Nov-2	Dec-1	Dec-2
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
2,5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	5	5	5	5	5	5	0	0	0	1	1	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	1	1	3	3	4	4	2	2	0	0	2	2	3	3	0	0	0	0
3,5	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	0	0	0
4	0	0	0	0	0	3	3	4	7	14	17	16	13	10	10	11	10	10	9	5	2	0	0	0
4,5	0	0	0	0	0	0	1	1	6	9	14	15	14	15	15	12	11	11	7	6	2	1	0	0
5	0	0	0	0	2	8	11	17	22	21	21	23	28	29	29	30	30	32	22	16	1	1	0	0
5,5	0	0	0	0	0	2	3	7	14	16	18	23	24	28	30	34	35	30	26	28	5	0	0	0
6	0	0	0	0	1	10	23	24	28	28	34	39	42	46	52	62	58	58	52	33	2	0	0	0
6,5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	6	6	6	6	10	13	8	9	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	2	2	3	3	3	3	3	3	9	9	7	9	12	6	0	0	0	0
7,5	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nombre de patterns ciblés sur chaque période	0	0	0	0	3	23	45	60	89	103	120	131	139	146	160	168	169	171	146	110	14	2	0	0

Figure 65 Décomposition par demi-mois des seuils de vitesse de vent retenus dans les patterns de régulation des rapports de suivis d'impacts
(les nombres des cases correspondent au nombre de rapports concernés)

➤ Température

Pour ce qui concerne le seuil de température, il est aussi très largement précisé dans les patterns de régulation retenus dans les rapports de suivis d'impacts (Figure 66). Il l'a été aussi très largement par le passé et a encore tendance à progresser.

Le seuil le plus largement utilisé est celui de 10°C. C'est le seuil le plus utilisé notamment dans le cadre du mode de régulation conventionnel. 12°C est aussi régulièrement utilisé. Les extrêmes concernent des températures de 5 à 21°C, mais pour très peu de cas.

Le graphique de la Figure 67 montre que ces seuils sont à nouveau surtout retenus pour la période de fin d'été / début automne.

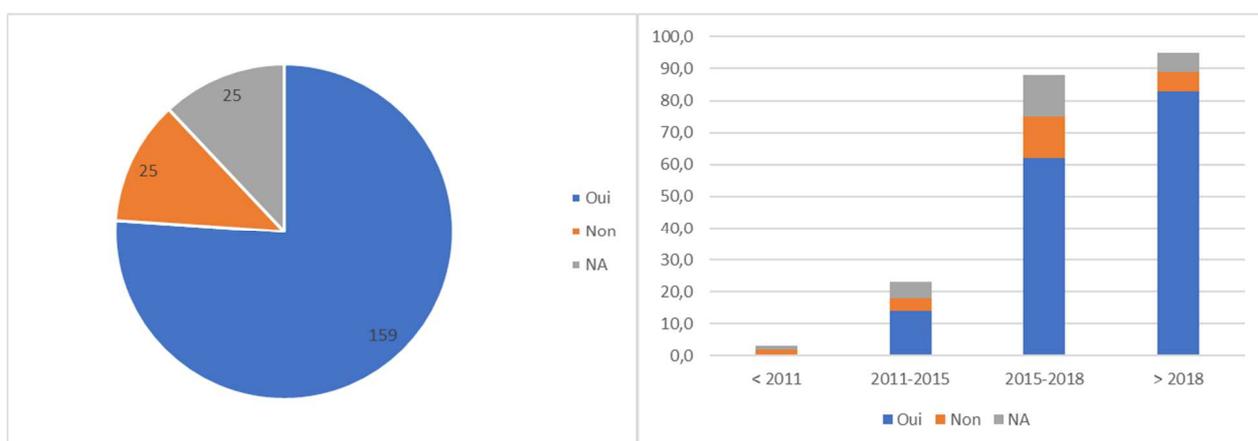


Figure 66 Proportion et nombre de patterns de régulation avec détail du seuil de température dans les rapports de suivis d'impacts

	Jan-1	Jan-2	Fev-1	Fev-2	Mar-1	Mar-2	Avr-1	Avr-2	Mai-1	Mai-2	Jun-1	Jun-2	Ju-1	Ju-2	Aou-1	Aou-2	Sep-1	Sep-2	Oct-1	Oct-2	Nov-1	Nov-2	Dec-1	Dec-2
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	2	3	3	3	2	2	4	4	5	5	6	6	6	5	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	3	5	5	5	4	4	4	4	4	5	5	4	6	7	6	2	0	0	0
9	0	0	0	0	0	1	2	2	2	2	4	4	4	4	3	3	3	3	1	1	0	0	0	0
10	0	0	0	0	1	7	16	24	31	32	38	44	48	47	53	64	65	63	61	43	2	1	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	5	1	0	0	0	0
12	0	0	0	0	1	8	13	12	18	21	27	27	27	27	31	32	32	31	26	20	5	0	0	0
13	0	0	0	0	0	1	3	4	5	7	6	12	11	11	11	11	11	11	9	4	1	0	0	0
14	0	0	0	0	1	1	1	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	5	4	3	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	3	3	3	5	3	7	8	7	8	7	10	11	13	6	4	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	1	3	3	2	5	3	0	2	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	5	5	1	1	1	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figure 67 Décomposition par demi-mois des seuils de température retenus dans les patterns de régulation des rapports de suivis d'impacts

➤ Précipitations

En ce qui concerne les précipitations, **seuls 11% des rapports qui retiennent une mesure de régulation intègrent ce paramètre dans le pattern de régulation**. Cette précision aurait tendance à légèrement progresser dans le temps (Figure 68).

Ce paramètre reste en effet **délicat à utiliser**. Son utilisation est basée sur l'idée selon laquelle les chauves-souris ne volent pas lorsqu'il pleut. Cependant globalement, les retours d'expériences documentés sur l'effet des conditions de précipitations sur les chauves-souris (par espèces, par type de comportements...) sont rares. Il est admis que les précipitations réduisent au moins l'activité des chauves-souris, ne serait-ce qu'en réduisant l'activité des insectes-proies et donc les comportements de chasse, mais aussi en faisant évoluer les capacités d'écholocation (portée moindre, parasite acoustique du bruit de la pluie qui tombe... (WU Xiu & al. 2020)) ou encore pour des raisons énergétiques (Voigt & al. 2011). Mais cela n'exclue pas toute activité lors de conditions pluvieuses (Geipel & al. 2019). Les chauves-souris peuvent alors décaler leurs heures d'émergence, voler moins loin de leurs gîtes, pendant moins longtemps... Cette activité peut alors dépendre du type (brouillard, pluie) et de l'intensité de la précipitation (Squires et al. 2021).

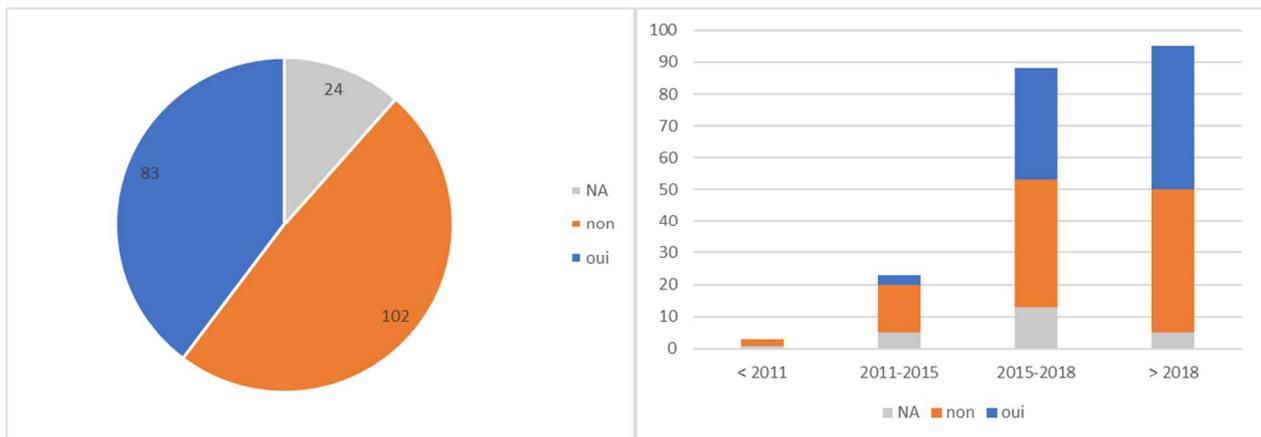


Figure 68 Proportion et nombre de patterns de régulation qui intègrent les précipitations comme paramètres dans les rapports de suivis d'impacts

Rares sont les études d'impacts ou suivis d'impacts qui cherchent réellement à corréliser l'activité des chauves-souris et les précipitations sur le site d'étude pour qualifier les conditions de vols et donc de risques éoliens. Rares sont aussi celles qui cherchent à préciser à la fois un paramètre mesurable et un seuil de précipitation à partir duquel on peut considérer que les risques de mortalité sont suffisamment faibles pour lever la mesure de régulation.

Pour l'ensemble des rapports de suivis d'impacts qui évoquent cette notion de précipitation dans le pattern de régulation (N=83), la majorité (64%) précise simplement « en l'absence de pluie / précipitation » ou « en l'absence de précipitation notoire / significative » sans qualification de la mesure et du seuil (Figure 69).

Pour les 36% des patterns qui font l'effort d'une qualification, le seuil de précipitation « notoire » est défini sur la base d'une intensité de pluie (hauteur d'eau en mm) par unité de temps (10-15min). Mais la mise en œuvre de ce paramètre suppose de vérifier au préalable la cohérence de ses effets sur l'activité du cortège d'espèces locales sur l'ensemble de la période d'activité et que l'exploitant dispose de moyens de mesures des précipitations (ici pluviomètre) pour la prise en compte de ce paramètre dans la régulation.

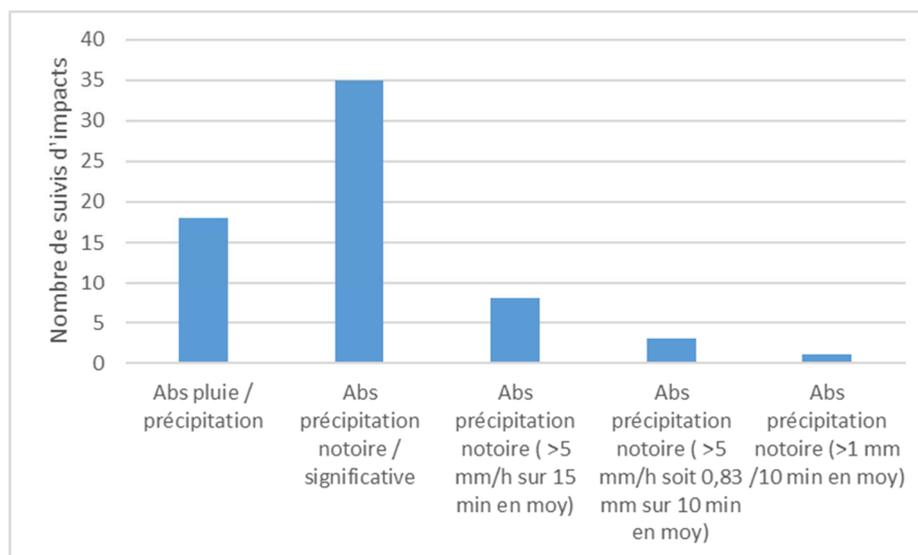


Figure 69 Types de qualifications du paramètre de précipitation lorsqu'il est utilisé dans le pattern de régulation des rapports de suivis d'impacts

Pour ce qui concerne les autres paramètres exploités dans les patterns de régulation, seule l'orientation du vent est évoquée dans le jeu de rapports de suivis d'impacts. Mais ce paramètre n'a été cité qu'à deux reprises pour les 209 rapports qui retiennent une mesure de régulation (<1%). Il n'est donc pas développé ici.

➤ Synthèse des tendances dans l'utilisation des différents paramètres du pattern de régulation

Finalement, le graphique suivant (Figure 70) fait une synthèse de l'évolution de la prise en compte des différents paramètres utilisés dans les patterns de régulation en fonction de l'évolution des prescriptions techniques nationales en termes de suivis d'impacts. Même si ces dernières n'apportent pas d'éléments jusqu'à ce jour à propos de la mesure de régulation et sur comment la dimensionner, le graphique montre que **les pratiques évoluent vers une progression constante du nombre de paramètres utilisés**. Cela s'explique probablement à la fois par un **partage progressif des pratiques et par une amélioration de la qualification des conditions de risques** (notamment via le développement des études d'activité des chauves-souris en hauteur sur chaque site)

On note que la vitesse de vent, la température et les plages horaires sont les paramètres de base exploités largement par la grande majorité des rapports qui retiennent une mesure. La décomposition saisonnière de la mesure ou le critère de précipitations ne sont exploités que dans moins de la moitié des cas, mais sont aussi en progression.

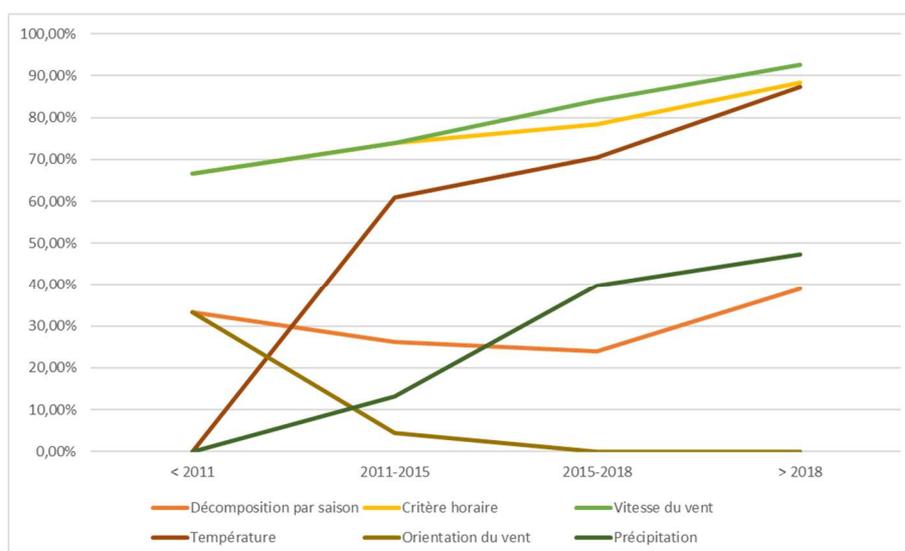


Figure 70 Tendence évolutive de l'utilisation des paramètres de patterns de régulation en fonction de l'évolution des prescriptions nationales

A retenir de cette partie

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.

De façon générale, **les patterns retenus semblent globalement de plus en plus conservateurs et de plus en plus fins** avec le temps, grâce notamment à l'apport de la progression des études d'activité en hauteur et de 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 octobre assez stable (octobre),
- Une durée moyenne de la période d'activation qui progresse en conséquence (5,2 mois en moyenne 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, on note une distinction de plus en plus marquée du seuil de vitesse de vent le plus haut sur la période régulièrement identifiée comme la plus à risque en fin d'été automne (août-octobre) et des vitesses moindres plus tôt dans l'année (printemps -début été),
- La progression du nombre de paramètres climatiques ou temporels utilisés pour dimensionner la mesure.

Pour les suivis d'impacts, on note que la mesure mise en œuvre au cours d'une première année tend de plus en plus à être revue sur les années suivantes en bénéficiant de la possibilité, favorisée par la réglementation en cours, de chercher le meilleur compromis via un renouvellement des suivis tant qu'un « impact significatif » est constaté. Cette phase d'optimisation progressive de la mesure 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 dans les études, faute de connaissance sur les variables le plus influentes et de mise en œuvre de systèmes de mesures adaptés (ex. pluviomètre, hygromètre, visibilimètre...).

2.2.3. Les pratiques de suivi / contrôle de la mesure

2.2.3.1. Comment la mesure de régulation est-elle contrôlée et évaluée ?

En général, mesurer l'efficacité quantitative d'une mesure de régulation nouvellement mise en œuvre sur la maîtrise des mortalités de chauves-souris, nécessite de **comparer le niveau de mortalités estimées (taux de mortalité) entre avant sa mise en œuvre et après sa mise en œuvre**. Pour tester l'effet d'une évolution correctrice (optimisation) d'une mesure déjà engagée, il s'agit de comparer le niveau d'impact estimé entre avant et après le redimensionnement de la mesure.

Pour que la comparaison interannuelle soit pertinente, elle doit être réalisée sur la base de méthodes de suivis de la mortalité, de traitement des résultats et de critères d'analyse aussi identiques que possible entre les deux campagnes. Et comme les résultats sont forcément influencés par une évolution des conditions, ils doivent aussi être **relativisés selon l'évolution de ces conditions** (protocole de suivi, traitement de données), mais aussi **de l'évolution interannuelle de l'activité** des chauves-souris. Enfin, comme l'efficacité de la mesure est aussi directement dépendante de sa **bonne mise en œuvre au cours de la campagne de suivi testée**, il est important de vérifier qu'elle ait été implémentée au niveau du parc conformément à ce qui avait été dimensionné et qu'elle n'a pas subi de dysfonctionnement au cours de la campagne testée.

Pour mesurer l'efficacité de la mesure par une approche plus qualitative, l'analyse des mortalités brutes est aussi importante à prendre en compte pour apprécier si la mesure a bénéficié certaines espèces plus qu'à d'autres, à certains types de vols / comportements, ou certaines phénologies saisonnières spécifiques. Cette approche est toutefois à prendre avec précaution du fait du caractère dégradé de la donnée brute.

Dans la base de données des rapports analysés, une partie de ces éléments qualitatifs est saisie. Pour ce qui concerne les espèces, même si toutes les mortalités brutes ne sont pas saisies, une attention est portée sur la détection / non-détection de six espèces souvent considérées comme les plus patrimoniales et sensibles (Grande noctule *Nyctalus lasiopterus*, Noctule commune *Nyctalus noctula*, Noctule de Leisler *Nyctalus Leisleri*, Sérotine bicolore *Vespertilio murinus*, Pipistrelle de Nathusius *Pipistrellus nathusii*, Minoptère de Schreibers *Miniopterus schreibersii*). La présence ou l'absence de pic d'activité ou de pic de mortalités (> 2 mortalités par passage, ou >3 mortalités sur deux passages) est aussi saisie pour permettre une synthèse à ce niveau.

Dans la pratique, pour 117 rapports ciblés sur le suivi d'un parc régulé (suivi de la mortalité, suivi de l'activité ou suivi de la mortalité ET de l'activité), la démarche de comparaison interannuelle des résultats n'est pas automatique (Figure 71). **37% des rapports ne présentent pas cette comparaison interannuelle** pour les données de mortalité et **50% ne le font pas non plus pour les données d'activité**. Autrement dit, avant même de rentrer dans les modalités de contrôle de la mesure, une bonne partie des études n'a pas intégré l'intérêt de l'analyse de l'efficacité des mesures engagées, ce qui limite toute perspective d'optimisation.

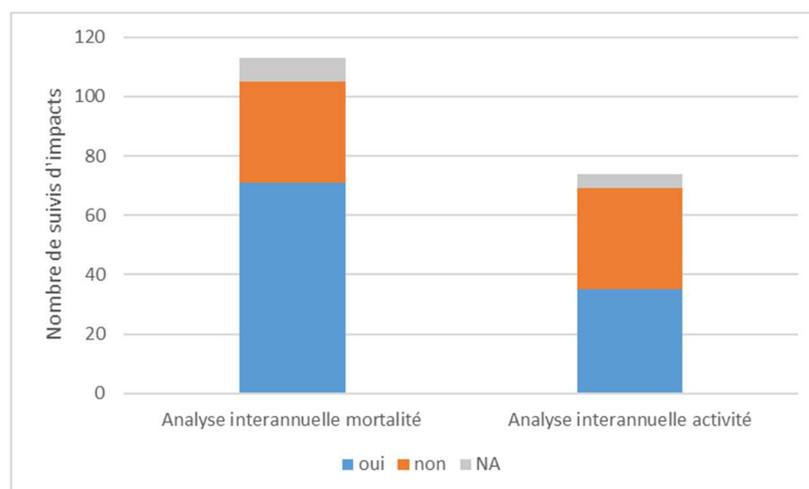


Figure 71 Proportion de rapports de suivis de parcs régulés qui présentent une analyse interannuelle des résultats

2.2.3.1.1. Pratiques concernant le choix des critères de comparaison interannuelle du niveau de mortalité (approche quantitative)

➤ **Mortalité estimée (taux de mortalité)**

Les critères utilisés pour juger de l'évolution interannuelle de l'impact par mortalités du parc éolien sur les chauves-souris peuvent être variés dans les rapports. La **mortalité estimée**, souvent notée « **taux de mortalité** » (nombre de mortalités de chauves-souris estimé par éolienne et par an) est le critère de comparaison idéal dès lors qu'il est calculé sur la base de méthodes et formules standardisées à l'échelle internationale (Erikson et al. 2000, Jones et al. 2009, Huso et al. 2010, Korner-Nievergelt et al. 2013, Huso et al. 2018). Lorsque ce taux de mortalité est ainsi calculé et présenté dans les rapports de suivis analysés, il est exploité dans la base de données « BDD Pratiques de la régulation / parcs exploités » et peut donc être utilisé pour une revue globale de l'efficacité de la régulation à l'échelle nationale.

Pour ce faire, les résultats de taux de mortalité produits par les rapports n'ont pas été vérifiés ou recalculés. Toutefois, comme il peut s'exprimer pour des unités de temps variables (taux de mortalité par an, pour la période d'activité des chauves-souris, pour la période de suivi réalisée...), il a quand même fallu procéder à une homogénéisation préalable du temps de référence. Le choix a été fait d'une période d'activité des chauves-souris de huit mois par an. Lorsque les résultats présentés dans les rapports se basaient sur une autre période de référence (ex. sept mois), ils ont été recalculés pour huit mois simplement par une simple règle de trois. A l'échelle d'un parc éolien, le niveau de mortalité estimé est le meilleur critère d'analyse de l'effet interannuel de la mesure de régulation sur l'évolution de l'impact chiroptérologique dès lors que les méthodes de suivi de mortalité et de traitement des données sont les mêmes d'une campagne à l'autre.

➤ **Mortalité brute**

Toutefois, vu les nombreux biais d'estimation inhérents aux suivis de la mortalité, vu la diversité des pratiques en termes de protocoles de suivi, des protocoles d'estimation des coefficients correcteurs, de pression d'échantillonnage, de choix et d'application des formules de calcul, d'expérience de l'analyste, de prise en compte ou non d'intervalles de confiance et vu les effets de cette variabilité des pratiques sur les résultats..., l'estimation du taux de mortalité est exposée à une variabilité de mise en application et d'interprétations des résultats. La seule utilisation de ce critère ne permet donc pas toujours d'aboutir à une perception unique, juste et précise de l'impact d'un parc éolien sur les chauves-souris et des comparaisons interannuelles ou inter parcs. La base de données « BDD Pratiques de la régulation / parcs exploités » intègre donc aussi un « **nombre de mortalités brutes pondérées** » par éolienne et par la pression d'échantillonnage (nombre de mortalités brutes / passage / éolienne X100). Ce critère est exploité par une partie des rapports ou d'autres programmes de revue à large échelle des impacts éoliens par mortalité (ex. travaux du bureau d'étude Ouest 'Am). L'utilisation de ce type de critère va à l'encontre des publications internationales car il est fortement biaisé et insuffisant pour caractériser la mortalité réelle, avec un biais d'ailleurs d'autant plus marqué que la pression d'échantillonnage est faible. Mais plus simple de calcul, il offrirait l'avantage de lisser la variabilité des pratiques de calcul entre les prestataires, et permettrait des comparaisons qui peuvent être considérées comme plus objectives entre les parcs, ou d'une année à l'autre sur le même parc dès lors que le protocole de suivi est identique. Sans chercher ici à statuer sur la pertinence ou non de l'utilisation de ce critère, il a été pris en compte ici pour cette revue de l'estimation des effets de la régulation puisqu'il est régulièrement exploité dans les rapports.

➤ **Corrélation mortalité estimée / mortalité brute**

Puisque le **taux de mortalité estimé** et la **mortalité brute pondérée** sont disponibles dans la base de données, une analyse de la cohérence des résultats est représentée par le graphique suivant (Figure 72). La **corrélation entre les deux variables semble plutôt mauvaise. Elle est d'autant plus faible que les résultats de mortalité sont importants.** Cela s'explique assez logiquement par l'effet de la variabilité des méthodes de suivis et des biais qui en résultent. En effet, les taux de mortalité les plus élevés correspondent souvent aux suivis qui pâtissent des plus forts biais méthodologiques (présence de végétation au sol induisant une faible efficacité de recherche, faible persistance des cadavres, faible pression de suivi, ...) et qui aboutissent à des fourchettes de résultats très larges (intervalles de confiance), malgré un nombre de mortalités brutes parfois modéré voire faible. A l'inverse, lorsque certaines études bénéficient d'une pression de suivi importante dans les meilleures conditions (zone de recherche défrichée, forte efficacité de recherche, faible

prédation...), les mortalités brutes peuvent être importantes sans pour autant que les résultats de la mortalité estimée soient élevés (fourchette de résultats plus fine).

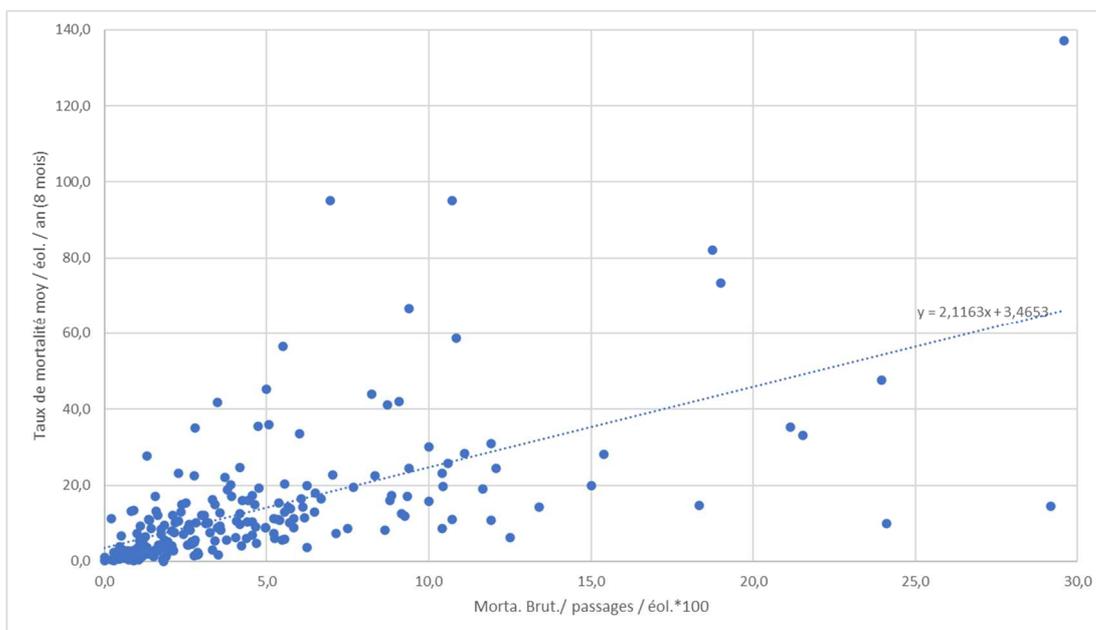


Figure 72 Corrélation entre résultats de la mortalité estimée et la mortalité brute pondérée

Dans la pratique, pour 19 rapports qui présentent sur une démarche argumentée de l’analyse interannuelle de l’impact éolien d’un parc régulé, **l’évolution des mortalités brutes** (rarement pondérées par la pression de suivi ou le nombre d’éoliennes) **est le critère le plus utilisé** au niveau des conclusions pour justifier l’analyse et donc potentiellement du besoin ou non d’une optimisation de la mesure (Figure 73). Ceci n’exclue pas toutefois que les autres critères soient aussi traités dans le corps du rapport. Cependant comme c’est souvent le principal argument présenté pour justifier l’évolution de l’impact, cela témoigne de la confiance relative portée pour le taux de mortalité dans les mentalités.

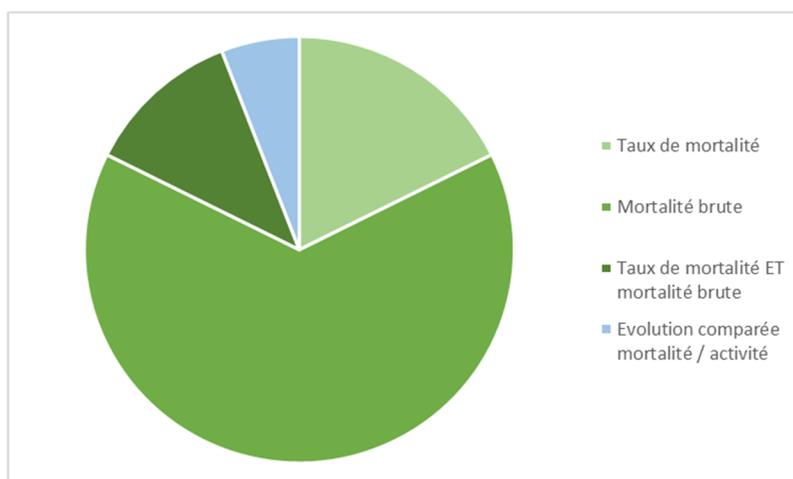


Figure 73 Proportion des critères les plus utilisés dans les conclusions d’analyses interannuelles de l’impact d’un parc éolien

2.2.3.1.2. Pratiques concernant le choix des critères d'analyse de l'évolution interannuelle de l'activité des chauves-souris

A l'échelle du parc éolien, l'analyse de l'efficacité de la régulation doit idéalement être pondérée par l'évolution de l'activité des chauves-souris entre les deux périodes, non seulement sur le plan quantitatif (niveau d'intensité d'activité global ou par périodes) mais aussi sur le plan qualitatif (évolution du cortège d'espèces, de la chronologie d'activité, des phénologies, des types de comportements, régularité des transits de haut-vols, pics d'activité ponctuels...).

Pour une revue globale de l'efficacité de la mesure dans les rapports de suivis d'impacts, la prise en compte de l'évolution de l'activité est délicate car il a été vu que tous les suivis ne bénéficient pas de suivis d'activité ou n'en tiennent pas compte pour analyser l'efficacité de la régulation. Dans les rapports qui détaillent cette comparaison interannuelle de l'activité des chauves-souris d'un site (N=12), les résultats ont été saisis et analysés (avant / après implantation du parc ou entre deux années d'exploitation d'un parc). Même si ces données sont à prendre avec précautions vu le faible nombre de retours, elles permettent une perception globale assez uniforme (Figure 74) :

- **Sur le plan quantitatif**, c'est-à-dire lorsque les rapports traitent de l'évolution de l'intensité d'activité entre deux campagnes de suivi, **aucun cas de réduction de l'activité n'est relevé dans les rapports analysés**. Cette intensité d'activité est jugée au moins cohérente d'une année sur l'autre, mais aussi et souvent plus forte après qu'avant, parfois avec des niveaux bien supérieurs, identifiés aussi bien au niveau du nombre et de l'intensité des pics d'activité, des périodes d'activité, ou de l'activité moyenne. Cette perception peut éventuellement être mise en relation avec les phénomènes d'attractivité des éoliennes lorsque les comparaisons portent sur l'évolution de la situation entre l'étude d'impact (suivi en hauteur sur mât de mesure) et le premier suivi d'impact (suivi depuis une nacelle d'éolienne). A notre connaissance, ce type d'analyse de l'activité en hauteur comparée entre avant et après implantation d'un parc éolien manque dans la littérature scientifique, ce qui renforce l'intérêt des quelques retours de suivis exploités ici.
- **Sur le plan qualitatif**, c'est-à-dire lorsque les rapports traitent de l'évolution des périodes d'activité ou des comportements d'une année à l'autre, ils évoquent souvent des **décalages de pics ponctuels d'activité ou de principales périodes d'activité**, et notamment une variabilité interannuelle surtout **marquée pour le début et la fin de la période d'activité** (printemps, automne). Cette variabilité est alors à mettre en relation avec la variabilité interannuelle des conditions climatiques favorables ou défavorables à ces périodes de l'année.

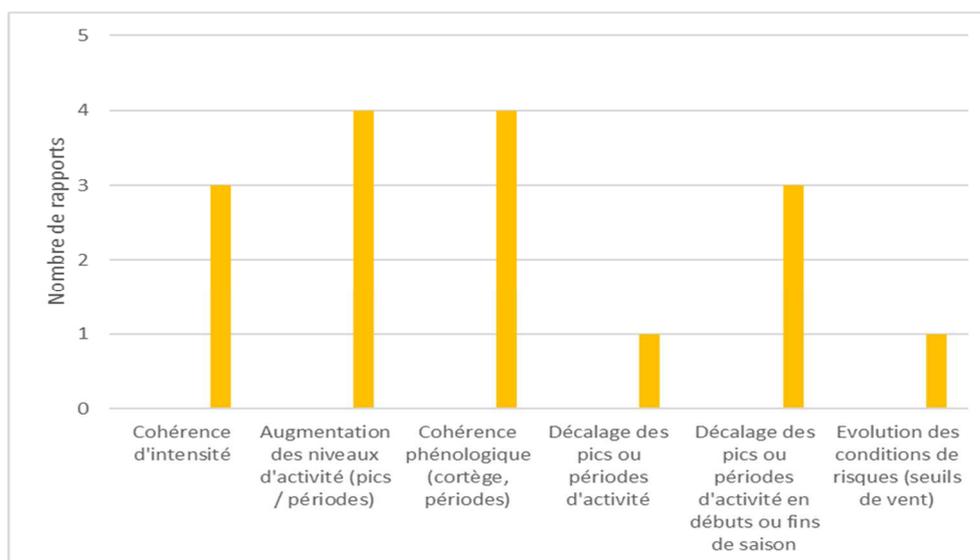


Figure 74 Synthèse des perceptions de l'évolution interannuelle de l'activité des chauves-souris en hauteur dans les rapports de suivis d'impact

2.2.3.1.3. Pratiques concernant l'analyse de la bonne mise en œuvre effective de la mesure au cours de la campagne testée

Un premier mode d'analyse de l'efficacité de la mesure de régulation consiste déjà à comparer les périodes de mise en œuvre de la régulation avec les dates de mortalités brutes. Mais pour prendre en compte l'effet de l'activité en hauteur et d'éventuels biais de mise en œuvre effective de la mesure (retard d'activation, périodes de dysfonctionnement...), une synthèse chronologique sur l'ensemble de la campagne de suivi est idéalement présentée en rappelant ;

- La période de suivi de l'activité,
- Les résultats de chronologie de l'activité en hauteur,
- La période de suivi de la mortalité,
- Les dates de découvertes des mortalités brutes,
- La période de mise en œuvre (vérifiée) de la régulation, et les éventuelles périodes de dysfonctionnement, retards d'implémentations...
- La période de dimensionnement initial de la régulation (si elle n'a pas été conformément appliquée),
- Voir les conditions climatiques

Pour 117 rapports ciblés sur le suivi d'un parc régulé, il a été recherché la proportion des rapports qui ont proposé une forme de synthèse chronologique comparative de ces différents paramètres pour étayer l'analyse de l'efficacité de la mesure (Figure 75).

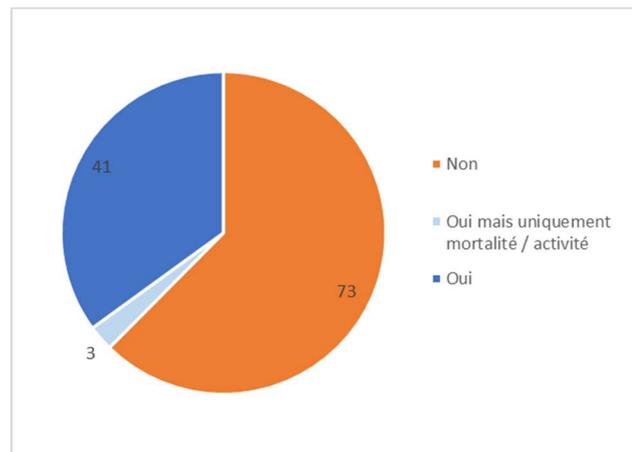


Figure 75 Taux de présence, dans les rapports de suivis de parcs régulés, d'une synthèse des périodes et résultats des suivis, et période de mise en place de la régulation

L'attention portée à la bonne ou mauvaise mise en œuvre effective de la régulation pendant la campagne de test a aussi été plus clairement recherchée dans les rapports. Cette attention peut prendre plusieurs formes ;

- soit une simple **consultation ou des informations fournies par l'exploitant** sur des problèmes d'implémentation constatés, de dysfonctionnements, notamment lorsqu'une surmortalité est constatée en cours de suivi,
- soit une **comparaison chorologique des données d'activité des éoliennes et des conditions climatiques** pour vérifier le respect du pattern de régulation retenu,
- soit encore la fourniture des **résultats d'analyse issues d'applications** développées justement pour vérifier que la mise en œuvre du pattern de régulation a bien été respecté au cours de l'année de test (ex. Probat inspector <https://www.probat.org/probat-tools/probat-inspector>).

Pour apprécier les pratiques sur cette question, ont été recherchés dans les rapports de suivis des parcs régulés (N=117), ceux qui présentent une retro-analyse fine de l'activité des éoliennes comparée à celle des conditions climatiques (approche tableur ou utilisation d'une application adaptée). On note **qu'à peine ¼ des rapports traitent cette question** (Figure 76).

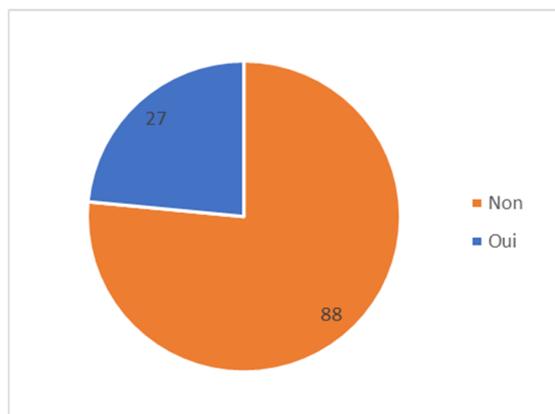


Figure 76 Proportion de rapports de suivis de parcs régulés qui vérifient la bonne mise en œuvre effective de la régulation sur la campagne testée

Et ce constat est d'autant plus problématique, que pour les 27 rapports qui s'intéressent finement à cette question (

Figure 77), 40% au moins mentionnent des écarts constatés entre le pattern retenu initialement et sa mise en œuvre effective sur la campagne de suivi.

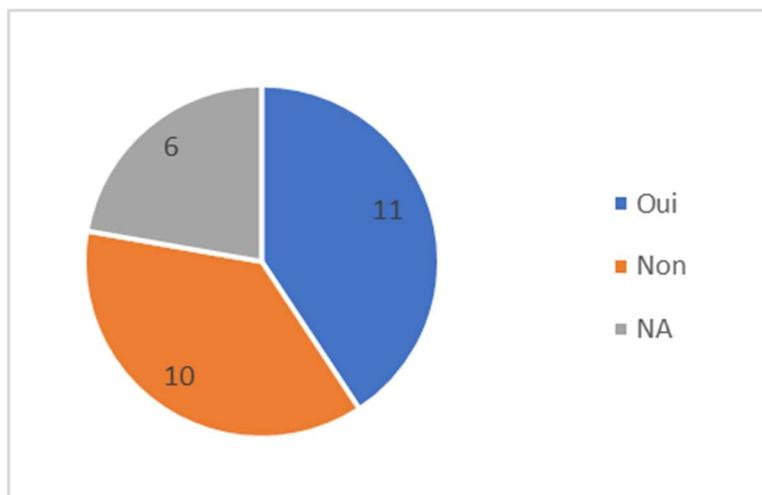


Figure 77 Importance de problèmes de mise en œuvre effective de la mesure dans les études qui ont traité cette question

Ces écarts constatés entre le pattern de régulation retenu et sa mise en œuvre effective sont **majoritairement liés à des retards de mise en œuvre de la mesure en début de campagne**. Ces retards interviennent alors souvent sur plusieurs mois et peuvent être à l'origine de surmortalités comparées aux périodes régulées, ce qui est assez facile à identifier à l'aide d'une synthèse chronologique d'activité / mortalité / régulation. On peut penser que ce type de problème est surtout lié à un **manque de pratique de la mesure, tant par l'exploitant que par le turbinier, et de problèmes de communication entre eux**.

Dans une moindre mesure, les écarts peuvent aussi se caractériser par (Figure 78) ;

- Des **périodes de dysfonctionnement**, plus ou moins longues (quelques jours, quelques semaines) au sein de la campagne de test,
- La non mise en œuvre de l'implémentation du pattern de régulation **dans une ou plusieurs éoliennes du parc**,
- Le **non-respect strict de certains paramètres ou certains seuils du pattern** retenus initialement, de façon ou moins importante ou permanente tout au long de la campagne de test. Ce type de problème peut parfois être lié à des contraintes techniques pour d'anciennes éoliennes pour lesquelles tous les paramètres climatiques ne sont pas suivis ou tous les paramètres ne peuvent être implémentés.
- Enfin, une dernière catégorie de dysfonctionnements relevés est liée à **des écarts de faibles niveaux mais réguliers tout au long de la campagne de test**. Dans ce cas, il peut s'agir de difficultés techniques fines dans la mise en œuvre de la mesure, comme par exemple des décalages d'horodatage plus ou moins fins entre la prise de mesure en continu des conditions climatiques, la prise de mesure de l'activité de rotation des éoliennes, d'éventuels délais d'envoi des ordres d'arrêt après détection de conditions à risque du pattern, ou encore des décalages de perception des horaires entre l'envoi d'un ordre d'arrêt et la mise à l'arrêt effective de l'éolienne (phase de décélération), ou à l'inverse un ordre d'activation de l'éolienne et une rotation (phase de redémarrage). Cette dernière catégorie ne peut être appréhendée qu'avec une analyse fine de l'activité des éoliennes en fonction des conditions climatiques. C'est donc probablement une catégorie encore sous-évaluée au vu de pratiques nouvelles et en cours d'acquisition.

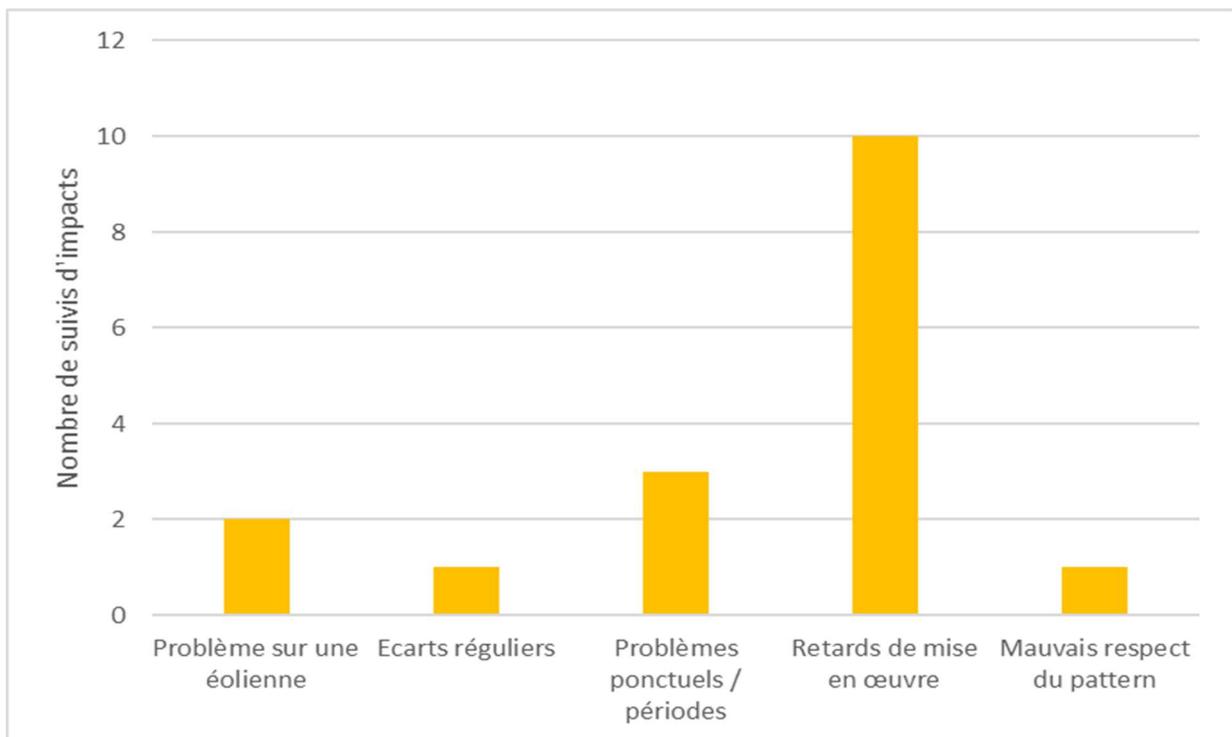


Figure 78 Typologie des principales causes d'écarts constatés entre le pattern et la mise en œuvre effective de la régulation

A retenir de cette partie

- 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.** En revanche, lorsque cette analyse est conduite correctement, on note l'absence de constat d'évolution négative de l'activité entre deux années. Ce qui est plutôt favorable pour une interprétation plus aisée de l'effet de la mesure.
- 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).

Enfin, ces retours montrent que les **problèmes de mise en œuvre effective de la mesure de régulation peuvent être importants et sous-évalués dans les études.** Ils peuvent induire une surexposition des chauves-souris aux conditions de risques, et donc un risque de non-conformité d'exploitation pour l'exploitant. Cela peut impliquer une surmortalité et donc une révision corrective du pattern de régulation à posteriori et un nouveau suivi. Mais si les mortalités sont plus liées à un défaut de mise en œuvre qu'à un défaut de dimensionnement de la mesure, alors rien ne garantit que la mesure sera efficace sur le long terme. Il se peut aussi que cette mauvaise mise en œuvre soit plus conservatrice que prévue, et dans ce cas-là, elle peut éventuellement générer plus de perte de production d'énergie que ce qu'elle aurait dû.

Enfin la mauvaise mise en œuvre effective de la mesure de régulation induit aussi des erreurs évidentes de perception de l'efficacité quantitative ou qualitative de la mesure de régulation, et à ce titre, elle **limite toute possibilité d'optimisation de 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.

2.2.3.1.4. Estimation moyenne l'évolution des niveaux d'impacts avant / après mesure de régulation

Les graphiques de la page suivante (Figure 79) synthétisent l'analyse de l'évolution du taux de mortalité estimé uniquement pour les parcs éoliens qui bénéficient de résultats entre les situations d'avant et d'après mise en œuvre de la mesure de régulation et les situations d'avant et d'après évolution de la mesure de régulation initiale (différents tests successifs). 52 campagnes de tests sont ainsi prises en compte ici pour une trentaine de parcs concernés (certains points sont superposés).

L'échantillon reste modeste (N=52) parce que les rapports de suivis du même parc sur plusieurs années sont encore relativement peu nombreux, parce que les rapports de la première année de suivi avant régulation n'ont pas pu être récupérés et utilisés pour cette comparaison avant/après ou encore parce qu'il n'existe pas de suivi de la mortalité sans régulation (régulation mise en œuvre dès la première année d'exploitation du parc).

Pour l'échantillon de 52 tests, 34 (65%) n'ont pas cherché à vérifier la bonne mise en œuvre effective de la mesure au niveau des éoliennes. Pour les 18 qui l'ont fait (35%), la moitié (9) relèvent des écarts entre le pattern retenu et sa mise en œuvre. C'est dire combien cette source de biais est importante et devra être pris en compte dans l'analyse des résultats. Nous n'excluons pourtant pas ces 9 tests dans l'analyse car ces problèmes de mise en œuvre de la mesure font partie intégrante du processus de régulation et donc de la perception de son efficacité qu'on cherche à mettre en évidence.

Les résultats sont présentés en fonction du niveau du seuil de vitesse de vent retenue dans le pattern de régulation, considéré comme le principal critère de la maîtrise des risques. Ce seuil de vitesse de vent étant amené à évoluer au sein de pattern de régulations décomposés par saisons / phénologies, l'analyse porte sur des moyennes de la vitesse de vent pour chaque régulation mise en œuvre (soit de 3,9 à 7 m/s sur l'échantillon de tests).

Les résultats de l'évolution du niveau de mortalités de chauves-souris avant et après la mesure sont présentés sur la base de l'évolution du taux de mortalité et sur la base de la mortalité brute pondérée. Au-delà de la possibilité de comparer les deux approches, l'intérêt réside aussi dans le fait que les résultats du taux de mortalité ne sont pas toujours disponibles dans les rapports (notamment lorsqu'aucune mortalité brute n'a été relevée) et n'ont pas été recalculés. Au contraire la mortalité brute pondérée est systématiquement disponible et son évolution a été recalculée.

Les graphiques sont aussi différenciés par année de test de la mesure, si plusieurs campagnes de tests ont été réalisées en faisant éventuellement évoluer le pattern de mesure (processus d'optimisation par mesures correctives). Dans tous les cas, les résultats traitent de la différence de mortalités entre l'année de test en question et la situation d'avant la première mise en place de la mesure.

De façon générale, les résultats montrent une **réduction évidente et notable du taux de mortalité après mesure. Elle est en effet estimée de façon globale à environ -57%** (57,4% de réduction du taux de mortalité, 56,9% de réduction de la mortalité brute pondérée). Cependant cette réduction diffère entre les études, l'année du test, et les niveaux de seuils de vent de régulation.

On note que dans certains cas, la mortalité a été jugée plus importante après régulation qu'avant régulation (deux cas avec le taux de mortalité, trois cas avec la mortalité brute pondérée). La différence de nombre de cas d'évolution positive de la mortalité selon le critères choisis (taux de mortalité et mortalité brute) témoigne bien du faible lien entre ces paramètres. L'évolution interannuelle de la mortalité brute pondérée pourra très bien être positive alors que celle du taux de mortalité sera négative et inversement (selon les conditions de suivis et l'évolution de ces conditions). La différence de perception est donc surtout due à une évolution de l'estimation du taux de mortalité entre les deux campagnes, liée à une évolution des coefficients correcteurs. Cependant ces divergences restent quand même très limitées et les évolutions sont en général plutôt cohérentes entre les deux paramètres même si les niveaux de variation diffèrent souvent un peu.

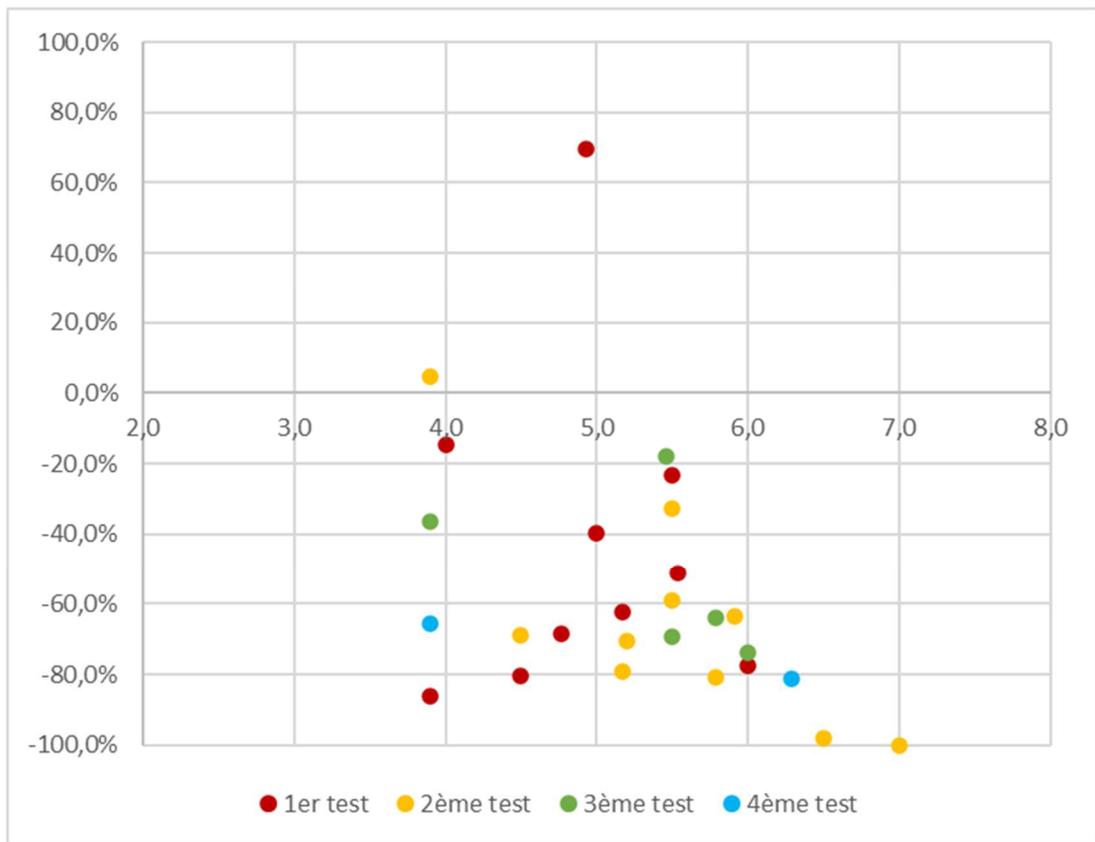


Figure 79 Evolution du taux de mortalité entre avant et après mesure de régulation en fonction du seuil moyen de vitesse de vent du pattern de régulation

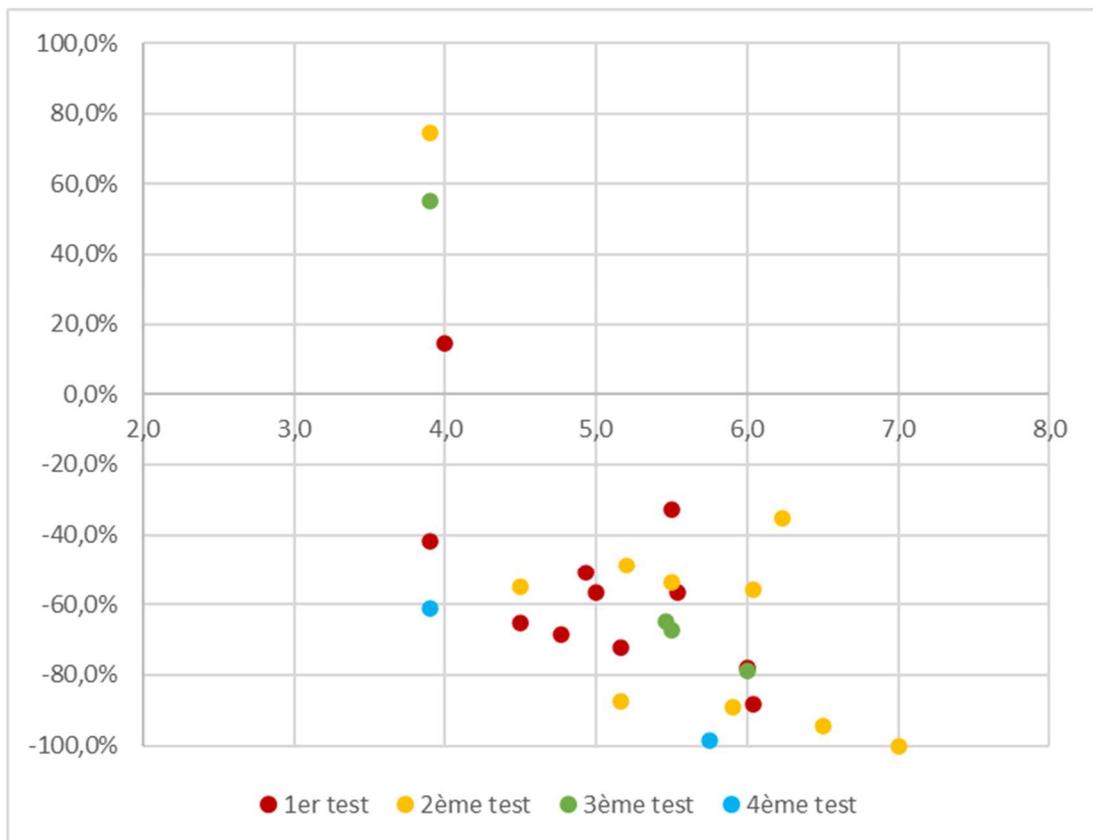


Figure 80 Evolution de la mortalité brute pondérée entre avant et après mesure de régulation en fonction du seuil moyen de vitesse de vent du pattern de régulation

➤ Evolution de l'efficacité de la régulation selon le nombre d'années du test si tests successifs (processus d'optimisation corrective de la mesure)

Pour ce qui concerne l'année de test, les résultats ne semblent pas toujours bien meilleurs avec l'avancées des campagnes de mesures correctives (Figure 81). Mais cette perception ne prend pas en compte si l'année en question est la dernière année pour laquelle le pattern a été testé ou pas. Pour les quelques tests qui ont été renouvelés quatre fois suite à des évolutions successives de patterns, les résultats semblent quand même meilleurs.

En fait, si on considère le taux de mortalité qui reste le critère le plus fiable pour tester l'évolution de l'impact sur le même parc, on note que c'est surtout la **variabilité du niveau d'efficacité de la mesure qui se réduirait en fonction du nombre de campagnes de tests**. Autrement dit, les **premiers patterns de régulation testés présenteraient une efficacité plus variable que ceux des années suivantes**. C'est d'ailleurs uniquement sur ces premières années de test qu'un échec d'efficacité se traduisant par une augmentation de la mortalité est relevé. Cette diminution de la variabilité interannuelle se caractérise par l'évolution de l'écart-type dans le graphique suivant. Si ce constat est évident pour le critère Taux de mortalité, ça l'est beaucoup moins pour le critère Mortalité brute pondérée.

Finalement, si en moyenne, les résultats caractérisent logiquement l'efficacité progressive de la mesure année après année, on note qu'une **part non négligeable de tests témoignerait d'une forte diminution de la mortalité (> -60, > -80%) dès la première année** de test d'une mesure de régulation. Cela confirme au moins que cet objectif est atteignable dans certaines situations.

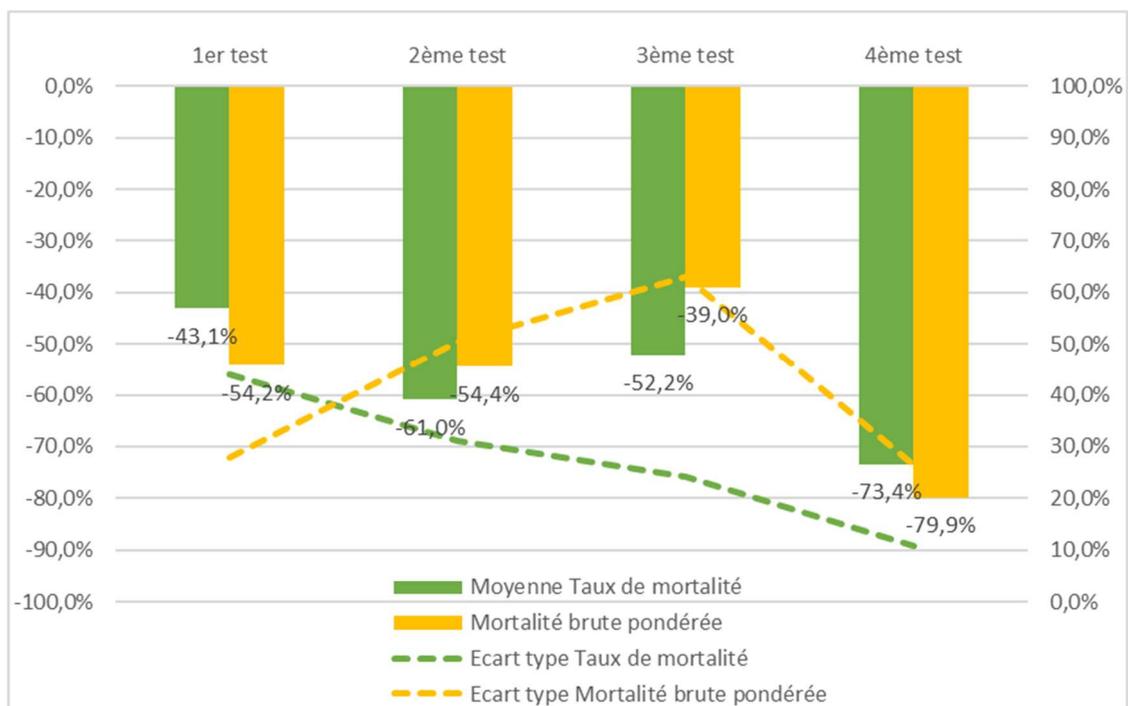


Figure 81 Evolution de l'impact par mortalité mesuré en moyenne entre avant et après mesure de régulation selon le nombre d'années de tests

➤ Effet du seuil de vitesse de vent

Pour ce qui concerne l'évolution de l'efficacité de la mesure en fonction du seuil de vitesse de vent moyen retenu dans le pattern de régulation (Figure 82), on constate logiquement que cette **efficacité est moindre pour les vitesses de vent les moins élevées**. Mais là encore, plus que le seuil de vitesse de vent lui-même, c'est la variabilité des résultats qui serait plus importante pour les faibles vitesses de vent les plus faibles. C'est notamment pour ces vitesses de vent faibles que les rares cas d'augmentation de la mortalité peuvent être notés, ce qui diminue sensiblement la moyenne d'efficacité. Pour autant, on note qu'une **part non négligeable de tests témoignent de fortes diminutions du taux de mortalité pour de très faibles seuils de vitesses de vent (<5, voire <4 m/s)**. Cela confirme au moins que cet objectif est aussi possible. Il faut toutefois préciser que le poids de ces résultats diffère entre les classes. Il est plus marqué pour la classe 5-6 m/s dont le nombre de tests prédomine (13 cas contre 5 pour la classe <4 m/s, 5 pour la classe 4-5 m/s, 4 pour la classe 6-7 m/s et 1 pour la classe >7 m/s).

Pour les seuils de vent les plus faibles (4-5 m/s), la réduction de mortalité est de l'ordre de 30-45%. Pour des seuils de vitesse de vent moyens de l'ordre de 5-6 m/s, l'efficacité dépasse 50-60% de réduction de la mortalité. Pour 6 à 7m/s de vitesse de vent de régulation moyenne, l'efficacité est très importante (80 à 100%).

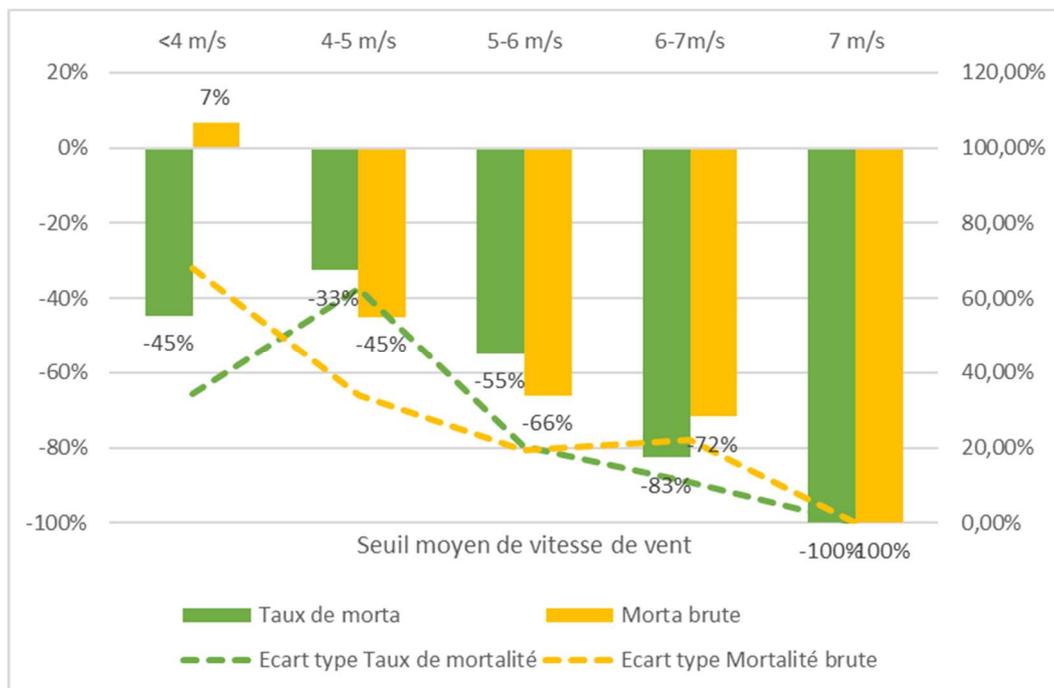


Figure 82 Evolution de l'impact par mortalité mesuré en moyenne entre avant et après mesure de régulation selon le seuil de vitesse de vent moyen du pattern de régulation

A retenir de cette partie

Finalement, ces 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 **vitesse 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%). Attention, les vitesses de vent indiquées ici sont des moyennes. En réalité, une vitesse moyenne de 6 m/s peut par exemple correspondre à un mixte de seuils de 4 à 5 m/s pour une majeure partie de la période d'activation et de 7 à 8 m/s pour d'autres périodes, selon les enjeux, les comportements, les phénologies...

Mais cette **efficacité est assez hétérogène selon les sites et selon les critères utilisés** pour la mesurer (et probablement selon les espèces, mais non 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 (<4m/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 largement sous-estimé à cause de nombreux problèmes de mise en œuvre effective de la mesure.

2.2.3.1.5. Comment sont argumentées les conclusions des études sur l'efficacité de la mesure passée pour la reconduction ou l'optimisation de la future mesure ?

Le choix objectif du seuil d'efficacité de la mesure à partir duquel il convient de confirmer ou de faire évoluer une mesure de régulation est toujours difficile. Il s'agit d'un point crucial de discussions entre les exploitants, les services de l'état et entre les chiroptérologues eux-mêmes. Si certains visent la maîtrise quasi-totale de toute mortalité de chauves-souris, d'autres prônent pour le meilleur compromis possible entre la maîtrise des niveaux de risques pour garantir l'absence d'effet sur les populations de chauves-souris ET la maîtrise des pertes de production d'énergie. Or faute d'une connaissance fine de la taille et de l'état de conservation des populations, il est quasi-impossible d'estimer l'effet de mortalités à l'échelle d'un parc ou de plusieurs parcs (effets cumulatifs) sur ces populations. Le positionnement de chacun vis-à-vis du seuil à fixer pour la mesure est donc souvent issu d'une perception personnelle. Les lacunes de connaissances de l'état des populations expliquent ce clivage de positionnement et des débats stériles entre les acteurs.

Pour juger de l'efficacité de la mesure en considérant qu'un seul individu impacté peut affecter la dynamique de toute sa population, alors l'absence de toute mortalité résiduelle devrait être recherché et la mesure de régulation doit être en fait considérée comme mesure d'évitement et non plus de réduction d'impact. Or il s'agit bien d'une mesure de réduction, et faute de connaissance de l'état des populations, le **choix du seuil minimum de maîtrise d'impact à retenir pour la régulation est donc malheureusement déconnecté de ses effets attendus sur les populations**. Au mieux, ce choix peut être fixé **en fonction d'un objectif de niveau de mortalité maximum à ne pas dépasser**.

L'**algorithme allemand Probat** (Renibat) fixe par exemple, par convention nationale, un objectif de maîtrise théorique de seuils de mortalités à un maximum de deux chauves-souris par éolienne et par an (voire une). Cet objectif est supposé atteignable par l'analyse automatisée (Probat) de l'activité acoustique mesurée sur le site en première année d'exploitation du parc, en relation avec les conditions climatiques (vitesse de vent principalement) et qui intègre donc une modélisation du niveau de mortalité attendu en fonction de l'activité mesurée, avec toutes les limites inhérentes à la pertinence du lien entre ces deux variables (cf. chapitre 3.3.3page 141).

Pour la plupart des tests des **autres types de mesures prédictives**, le choix de la reconduction ou de l'évolution de la mesure est également basé au moins en partie sur l'appréciation du niveau de mortalité de l'année passée, plus ou moins pondérée par d'autres sources d'informations (activité en hauteur, conditions climatiques, mise en œuvre effective de la mesure, évolution interannuelle du niveau de mortalité...). Sur le principe, la démarche est donc comparable avec Probat à la différence près que **le choix du seuil de régulation cible est retenu par le chiroptérologue lui-même et non pas par l'algorithme standardisé Probat**. L'avantage est que la décision peut se fonder sur une analyse plus qualitative de celle d'un simple objectif de taux de mortalité à ne pas dépasser, toutes espèces confondues. Le dimensionnement à retenir peut alors tenir compte des espèces, de leur patrimonialité, des types de comportements (phénomènes de pics, transits ponctuels d'espèces de haut vol...), d'autres critères climatiques que le vent. Le chiroptérologue fait alors le choix en conscience de ces éléments selon la variabilité de chaque site. Il est alors en mesure d'argumenter en conscience le dimensionnement de la mesure auprès de l'exploitant et l'administration. Via cette démarche, il est donc aussi en mesure de progresser sur l'écologie de vols des chauves-souris en plein ciel. L'inconvénient est lié à la différence de traitement des chiroptérologues selon leurs expériences et la qualité des études pour permettre ces analyses qualitatives. Mais rappelons qu'à ce jour, en l'absence de perception fine de l'état de conservation des populations, il n'y a pas de cadre national qui prenne position en France sur ce qui est acceptable ou non acceptable. C'est donc bien sur la base de la qualité des études et de la pertinence de l'argumentation des choix de mesure au cas par cas que les services de l'état doivent se prononcer.

Nous avons cherché à caractériser cette démarche dans l'échantillon de rapports analysés sur la base ;

- des **conclusions sur l'efficacité de la mesure** testée (échec, succès, succès partiel....)
- de la **justification de la pertinence du pattern** testé,
- de la **décision de faire évoluer ou non** ce pattern pour les campagnes à venir.

Dans les rapports de suivis d'impacts qui ont pu tester l'effet d'une campagne de régulation, les graphiques suivants (Figure 83, Figure 84) synthétisent les conclusions données sur l'efficacité de la mesure en comparaison avec les évolutions avant / après du taux de mortalité (graphique du haut) et de la mortalité brute pondérée (graphique du bas).

La perception d'un **échec d'efficacité justifiant une évolution de la mesure** semble assez évidente pour les cas d'évolution positive des niveaux d'impacts ou bien pour de faibles diminutions des niveaux d'impacts (> -40%) au cours de la campagne de test. Les conclusions sont moins évidentes (pas d'analyse conclusive) quand l'évolution du taux de mortalité et de la mortalité brute pondérée ne sont pas cohérentes entre elles.

La perception d'un **succès d'efficacité** semble assez évidente pour les cas de forte réduction des niveaux d'impacts (plus 60% de diminution), voire pour des réductions un peu moindres (plus de 40 -50% de diminution). Mais même avec des réductions très notables des niveaux de mortalités (> -50%), une bonne partie des études concluent sur un succès partiel nécessitant une mesure corrective.

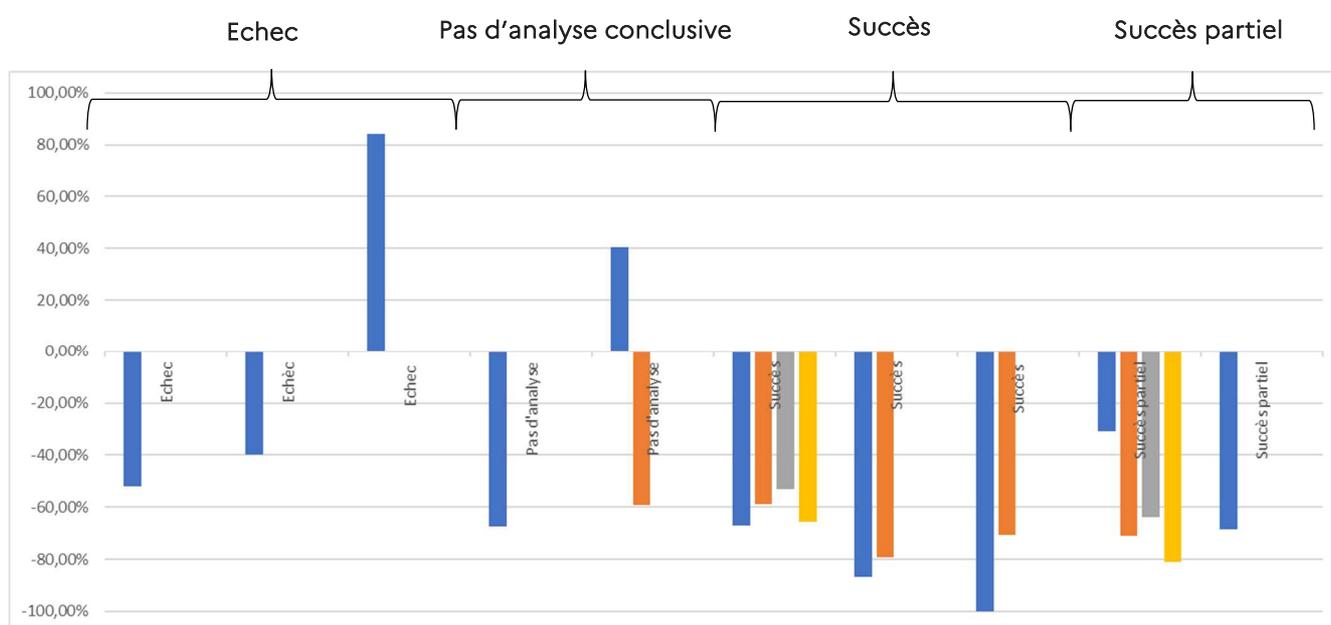


Figure 83 Appréciation de l'efficacité de la mesure de régulation en fonction de l'évolution du taux de mortalité dans les rapports de suivis d'impacts

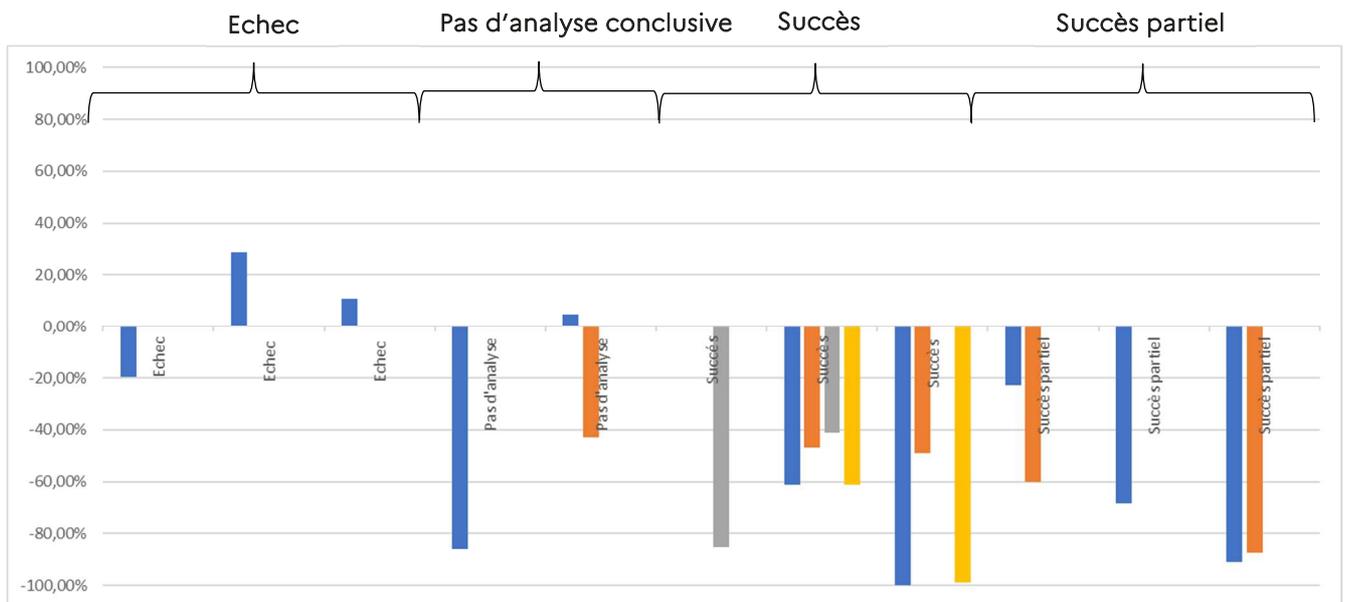


Figure 84 Appréciation de l'efficacité de la mesure de régulation en fonction de l'évolution de la mortalité brute pondérée dans les rapports de suivis d'impacts

Au-delà de la simple évolution d'un niveau d'impact, d'autres paramètres sont généralement pris en compte pour conclure sur l'efficacité ou non de la mesure et sur le besoin d'une optimisation. Le **niveau d'impact résiduel (après mesure) est le critère primordial** (ex. maximum de deux chauves-souris par éolienne et par an ciblé par Probat).

Dans la pratique, là encore, les **conclusions d'échec semblent assez évidentes à donner lorsque les niveaux de Taux de mortalité résiduel ou de Mortalité brute résiduelle sont élevés et dépassent le seuil de 10 chauves-souris par éolienne et par an ou de 10 mortalités brutes pondérées**. Un impact résiduel élevé (et notamment très élevé) pour un seul des deux critères d'analyse semble suffire à cette perception d'échec.

L'efficacité de la mesure (Succès) est perçue lorsque les niveaux d'impacts résiduels sont faibles. Mais là, **les deux critères d'analyse semblent devoir être faibles pour aboutir à cette conclusion de succès**. Les niveaux du taux de mortalité sont alors de moins de cinq mortalités par éoliennes et par an. Pour les cas où ce taux de mortalité résiduel est légèrement supérieur à ce seuil, la perception de succès est appuyée par l'absence ou de très faibles niveaux de mortalité brute.

Les **difficultés de perception (pas d'analyse, succès partiel) interviennent plus pour des valeurs intermédiaires d'impacts résiduels (5-10 mortalités par éolienne et par an)** pour lesquelles les niveaux de mortalités brutes sont faibles.

La notion de succès partiel intervient aussi souvent lorsque l'analyse comparée des dates de mortalité et de la période de régulation montre que la régulation semble avoir été efficace mais insuffisante en termes de période.

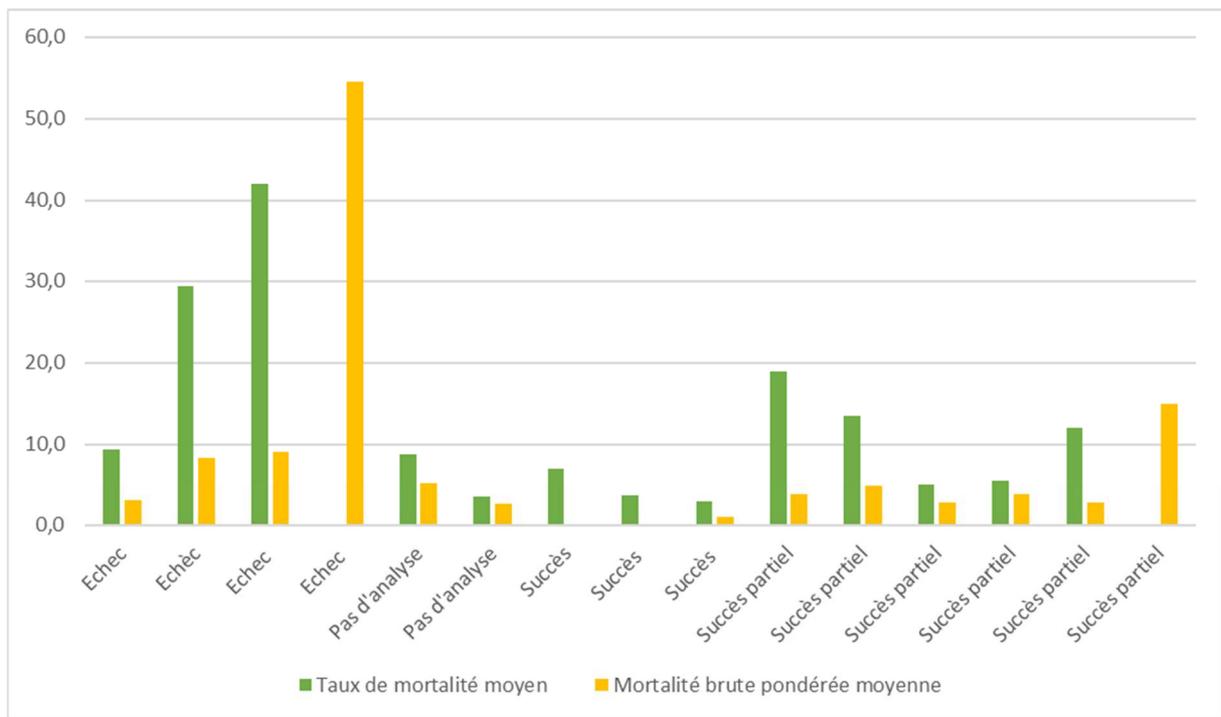


Figure 85 Appréciation de l'efficacité de la mesure de régulation en fonction de l'évolution du niveau d'impact résiduel (après mesure) dans les rapports de suivis d'impacts

En réalité, dans les rapports, la **conclusion sur l'échec, le succès de la mesure et la nécessité ou non de la revoir est un processus bien plus complexe** qu'un simple seuil de mortalité résiduel ou une évolution de cette mortalité résiduelle entre avant et après. Quand l'analyse n'est pas automatisée par un algorithme prédéfini (type Probat), elle peut intégrer une **analyse plus qualitative à la fois des résultats des suivis de la mortalité et de l'activité en hauteur, des plages de suivis et résultats comparés, des comportements (période d'activité, pics d'activité massifs, régularité de fréquentation d'espèces patrimoniales de haut-vol), des phénologies spécifiques, des conditions climatiques, mais aussi des conditions de suivis, des méthodes, problèmes technique, de la bonne ou mauvaise mise en œuvre effective de la mesure au niveau des éoliennes....** Cette multitude de paramètres à prendre en compte pour faire le constat le plus objectif possible de l'efficacité de la mesure, puis pour justifier du besoin ou non d'optimiser cette mesure, traduit la diversité des conclusions des rapports de suivis analysés. Ces conclusions et justifications ont fait l'objet de regroupements typologiques présentés ci-après (Tableau 14 page 114).

Pour les études qui testent une campagne de régulation, 71% concluent à un succès ou un succès partiel de la mesure, 12,5% concluent à un échec de la mesure, et **16,5% ne concluent pas clairement sur l'efficacité ou l'absence d'efficacité de la mesure** (Figure 86). Cette absence de conclusion claire sur l'efficacité des mesures est une non-conformité au sens du protocole de suivi environnemental 2018. Car ce dernier rappelle bien que le suivi [...] *doit proposer une analyse quant à l'impact du parc et l'efficacité des éventuelles mesures en place* [...] et qu'en fonction des résultats, il doit [...] *proposer au besoin une révision adaptée (à la hausse ou à la baisse) des mesures en place (ex. évolution du choix du plan de régulation [...] [...] retenir au besoin d'autres mesures correctives... et prévoir au besoin un nouveau suivi pour en vérifier l'efficacité* [...] (MTES/DGPR/DGALN 2018).

Quand les études concluent à un **succès de la mesure de régulation, on note que 60% d'entre elles concluent sans réellement d'argumentation** (Figure 86), ce qui ne va pas non plus dans le sens d'un processus scientifique, objectif et transparent.

Pour l'ensemble des conclusions sur l'efficacité de la mesure, on note qu'une partie des arguments qui conduisent à cette conclusion concerne les problèmes de mise en œuvre effective de la mesure. Parfois ces problèmes constatés sont utilisés pour conclure à un échec de régulation. Cependant ils ne remettent parfois pas en cause l'efficacité de la régulation. C'est alors souvent une question de plage de régulation non

conforme qui fait que la mesure semble efficace, mais non exploitée sur l'ensemble de la période à risques. La conclusion de succès, de succès partiel ou d'échec avec ce type de problématique témoigne donc d'une divergence de perception et de terminologie.

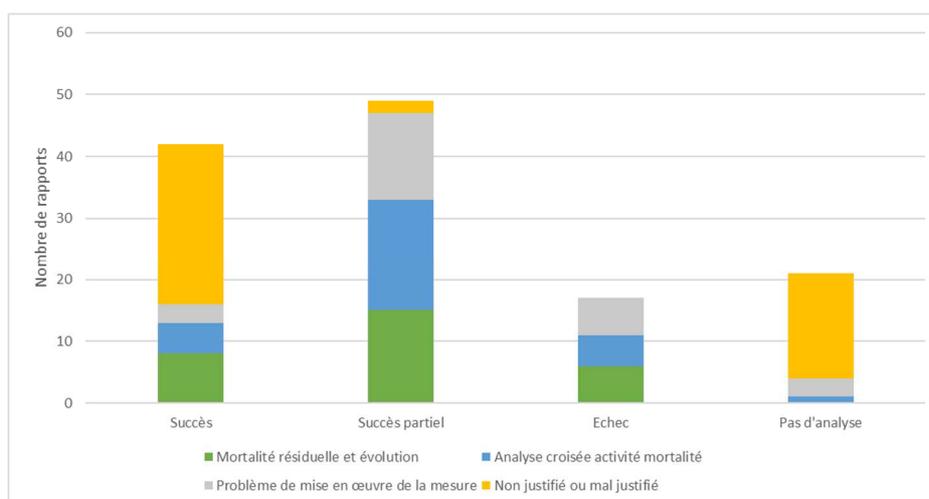


Figure 86 Typologie des principales argumentations utilisées pour conclure sur l'efficacité ou l'absence d'efficacité de la mesure de régulation dans les rapports de suivis d'impacts

Contrairement aux autres types de conclusions, lorsque la conclusion aboutit à un échec d'efficacité, elle est toujours argumentée.

Au-delà des éléments précédents, pour ce qui concerne les principaux types d'argumentations utilisés, **c'est surtout l'approche des mortalités (évolution des niveaux, niveaux résiduels) qui aboutit sur la conclusion d'un échec ou d'un succès de la mesure.** Les conclusions de succès partiels reposent beaucoup plus sur une argumentation liée à une analyse multicritère, dont l'activité en hauteur en plus de la mortalité. C'est notamment via cette finesse d'analyse qu'il est possible de percevoir que si la mesure est efficace sur la période de test elle devrait être parfois réadaptée en termes de plage d'activité pour correspondre aux périodes de risques mis en évidence par le suivi de l'activité.

Sur la base des éléments précédents, les tableaux de la page suivante détaillent plus finement à la fois les arguments utilisés pour conclure sur l'efficacité de la mesure et ensuite sur la décision de maintenir ou de faire évoluer la mesure pour les campagnes à venir. Plusieurs types d'arguments sont parfois utilisés.

- Lorsque les études concluent à un échec de la mesure, toutes prescrivent logiquement une révision à la hausse de cette mesure** pour les campagnes à venir. La justification et le dimensionnement de cette révision à la hausse découlent alors à la fois, et de façon assez homogène, de constats liés à la mortalité, de constats et analyses fines de l'activité en hauteur croisée notamment à la mortalité, et de constats de problèmes de mise en œuvre effective constatés de la mesure. Lorsque seules les données de mortalités sont utilisées, **c'est surtout le niveau de mortalités brutes résiduelles qui semble être le critère le plus exploité.** Le taux de mortalité résiduel ou la mortalité résiduelle d'une espèce en particulier sont des arguments moins utilisés.
- Lorsque les études concluent à un succès de la mesure, la majorité prescrivent logiquement une reconduite de la mesure en l'état.** Mais les **30% restant prescrivent aussi bien une évolution à la hausse (9,5%), une évolution à la baisse (12,5%)** voire un changement de mode de régulation. Pour moins de la moitié de ces études, la justification et le dimensionnement de ces évolutions ou confirmations du pattern de régulation reposent sur des arguments de même ordre que pour les échecs. Ainsi **lorsque c'est la notion de mortalité qui est exploitée, le succès de la mesure est alors perçu sur la base d'une faible mortalité résiduelle (surtout mortalité brute), mais rarement sur l'absence totale de mortalité résiduelle.** Il est aussi parfois argumenté par l'absence d'espèces hautement patrimoniales dans le cas une faible mortalité résiduelles globale.

Lorsque ce sont les données croisées de mortalité / activité ou autre qui sont à l'origine de la perception de succès, plusieurs niveaux d'analyse voire de simulations de l'effet de la mesure sur l'activité des chauves-souris peuvent être exploités. Ils aboutissent parfois à la possibilité de revoir à la baisse les mesures si cette évolution est suffisamment argumentée. Parfois le suivi d'activité en hauteur qui s'organise sur une plage plus longue que celui de la régulation ou du suivi de la mortalité permet de mettre en évidence des périodes à risques non protégées par la mesure (notamment en début et fin de période d'activité des chauves-souris). Dans ce cas, la prescription peut être celle d'un ajustement de la période de régulation à venir.

A noter que plus de la moitié des conclusions qui concluent à un succès de la mesure ne sont pas réellement argumentées et aboutissent finalement très majoritairement une reconduite du pattern.

- **Lorsque les études concluent à un succès partiel de la mesure, elles induisent logiquement très majoritairement une prescription de révision à la hausse du pattern de régulation.**

Nous avons vu que cette notion de succès partiel provient surtout des apports du suivi d'activité croisé de l'activité et de la mortalité. C'est notamment le cas d'une mesure qui semble efficace sur la période d'activité mais insuffisante vis-à-vis de la période de risque identifiée grâce au suivi de l'activité. Le suivi de l'activité permet aussi clairement de pondérer des perceptions d'efficacité relative qui seraient issues des seules données de mortalité. L'absence de suivi d'activité en hauteur est alors aussi considérée comme une limite à l'appréciation de l'efficacité de la mesure.

Lorsque cette notion de **succès partiel** découle uniquement des relevés de mortalité, c'est notamment le cas lorsque l'analyste identifie un succès différencié dans l'espace c'est à dire pour sur certaines éoliennes mais pas toutes, ou dans le temps, c'est-à-dire sur certaines périodes / phénologies / espèces mais pas toutes.

Enfin, cette notion de succès partiel est aussi souvent liée à des problèmes techniques de suivis ou de mise en œuvre effective de la mesure. La régulation semble alors efficace, mais elle l'aurait été probablement bien plus si la mesure avait été engagée telle que prévue initialement (retards de mise en œuvre, problèmes techniques...).

- **Enfin, pour les études qui ne concluent pas clairement sur l'efficacité de la mesure,** la mesure est aussi logiquement surtout revue à la hausse, mais beaucoup d'entre elles aboutissent à la reconduction de la mesure en l'état, sans justification.

Tableau 14 : Tableaux de synthèse des relevés des types d'argumentations présentés dans les rapports pour justifier de la reconduite, où de l'évolution de la mesure de régulation

Echec	Changement de mode	Confirmation pattern	Revu à la baisse	Revu à la hausse	Sans prescription	Total
Justification principale liée à la mortalité résiduelle et son évolution						
Mortalité résiduelle brute jugée trop importante				4		4
Mortalité résiduelle jugée trop importante pour une espèce cible				1		1
Réduction de la mortalité brute mais taux de mortalité encore important				1		1
Justification principale liée à l'analyse croisée activité mortalité						
Seuils du pattern jugés insuffisants ou mal adaptés				3		3
Absence de suivi en hauteur pour juger objectivement				1		1
Justification principale liée à une mauvaise mise en œuvre de la mesure						
Mise en œuvre non conforme (éoliennes, périodes, régulation préventive)				6		6
Succès						
Justification principale liée à la mortalité résiduelle et son évolution						
Faible niveau d'impact résiduel pour des espèces communes		1				1
Efficacité de la régulation, mais encore quelques mortalités			1	2		3
Réduction mortalité mais manque suivi en hauteur pour juger objectivement		3				3
régulation efficace mais impacts résiduels sur qq espèces, périodes, comportements		1				1
Justification principale liée à l'analyse croisée activité mortalité						
Cohérence générale entre réduction d'impacts et activité		2				2
Simulation de l'effet de protection de la mesure sur l'activité (%)			1			1
Simulation de l'effet à attendre d'une augmentation des seuils		1				1
Efficacité sur la période testée mais activité témoigne d'une plage de risque plus large				1		1
Argumentation nulle ou mal étayée						
Pas d'explication argumentée		20	2	1		23
Argumentation faible, et non conclusive					1	1
Test expérimental	2					2
Justification principale liée à une mauvaise mise en œuvre de la mesure						
Mise en œuvre non conforme		1	1		1	3
	2	29	5	4	2	42
Succès partiel						
Justification principale liée à la mortalité résiduelle et son évolution						
Mortalité résiduelle brute jugée trop importante	1		1	2		4
Mortalité résiduelle jugée trop importante pour une espèce cible						0
Diminution de la mortalité brute mais taux de mortalité encore important				3		3
Mortalité efficace mais pas sur toutes les éoliennes				3		3
Mortalité efficace mais pas sur toutes les périodes		1		4		5
Justification principale liée à l'analyse croisée activité mortalité						
Efficacité sur la période testée mais activité témoigne d'une plage de risque plus large				9		9
Analyse fine mortalité activité (niveau d'activité à risque résiduel)				3		3
Analyse multicritères fine de l'activité / mortalité / conditions /				5		5
Absence de suivi en hauteur pour juger objectivement	1					1
Justification principale liée à une mauvaise mise en œuvre ou mise en œuvre partielle de la mesure						
Régulation préventive en cours de suivi	1			1		2
Mise en œuvre non conforme		3		7		10
Problème d'efficacité lié aux problèmes de suivis		1		1		2
Autre justification						
Régulation efficace mais trop de perte de production -> régulation dynamique	1	1				2
	4	6	1	38	0	49
Absence de conclusion sur l'efficacité de la mesure						
Car mal mise en œuvre		1	1	1		3
Car problèmes de suivis		1				1
Sans justification		7		9	1	17
	0	9	1	10	1	21

3. Volet 2 : Tester les principaux modèles de régulation (volet expérimental)

Le volet 2 du programme consiste à tester de façon expérimentale les principaux modèles de régulation des éoliennes sur un parc éolien jugé « à risque » pour les chiroptères.

Les principaux modèles de régulations testés sont :

- **La régulation à très faible vitesse de vent, sous seuil de production d'énergie.** L'intérêt de ce mode de régulation a déjà été montré, mais pas en France, et sans distinction des groupes d'espèces et types de risques bénéficiaires, et sans précision des modes de mise en œuvre (arrêt des rotors ou ralentissement ? quelles limites d'efficacité ? etc.) ;
- **La régulation préventive, « à l'aveugle »,** généralement préconisée par convention en l'absence de connaissance fine de l'activité locale des chauves-souris des conditions de risques. Les seuils sont alors souvent retenus de façon empirique pour que les éoliennes ne puissent être exploitées que pour des vents supérieurs à 6 m/s et des températures inférieures à 10°C ;
- **La régulation prédictive multicritères,** proportionnée aux conditions de risques locales. Les principaux paramètres utilisés et à adapter au cas par cas après analyses des conditions locales des risques seront notamment la vitesse de vent, la température, les heures de la nuit, la saison, les précipitations, mais aussi éventuellement l'orientation du vent, la pression atmosphérique, ou des critères combinés (ex : point de rosé).

3.1. Matériel et méthodes (volet 2)

3.1.1. Principes généraux

Les objectifs de cette étude sont, dans un premier temps, (i) de comparer 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 et, dans un second temps, (ii) d'identifier et de hiérarchiser les différents facteurs régissant les taux de mortalité. Pour appréhender la diversité des effets et des facteurs affectant la mortalité, nous avons décliné ce second objectif en différents axes d'analyses visant à (i) caractériser l'effet des conditions climatiques et du fonctionnement de l'éolienne sur la mortalité ; (ii) caractériser l'effet de l'activité au sol et en altitude sur la mortalité et (iii) caractériser l'effet des conditions climatiques sur l'activité de différents groupes d'espèces.

3.1.2. Choix du site

Le parc éolien étudié est situé dans l'Aveyron, sur la commune d'Arques (44°20'01.3"N ; 2°48'40.3"E). Il est exploité par TotalEnergies depuis novembre 2017. Il est composé de onze éoliennes Enercon E70/2000, installées sur un axe est-ouest, formant deux lignes espacées d'environ 1,5 km composées de six machines (ouest) en activité depuis fin 2017 et cinq machines (est) en activité depuis 2018 (Figure 1A). Le diamètre du rotor est de 70 m avec une hauteur minimale et maximale en bout de pale de 64 m et 113 m respectivement. Le seuil de vitesse de vent à partir duquel l'éolienne produit de l'énergie est d'environ 2,5 m/s (*Cut-in wind speed*). Les caractéristiques techniques des machines sont présentées en Annexe 1. Le parc comprend un contexte paysager diversifié, composé d'une mosaïque de boisements et d'un réseau de haies plus marqués sur la ligne ouest (cf. Figure 89 page 118).

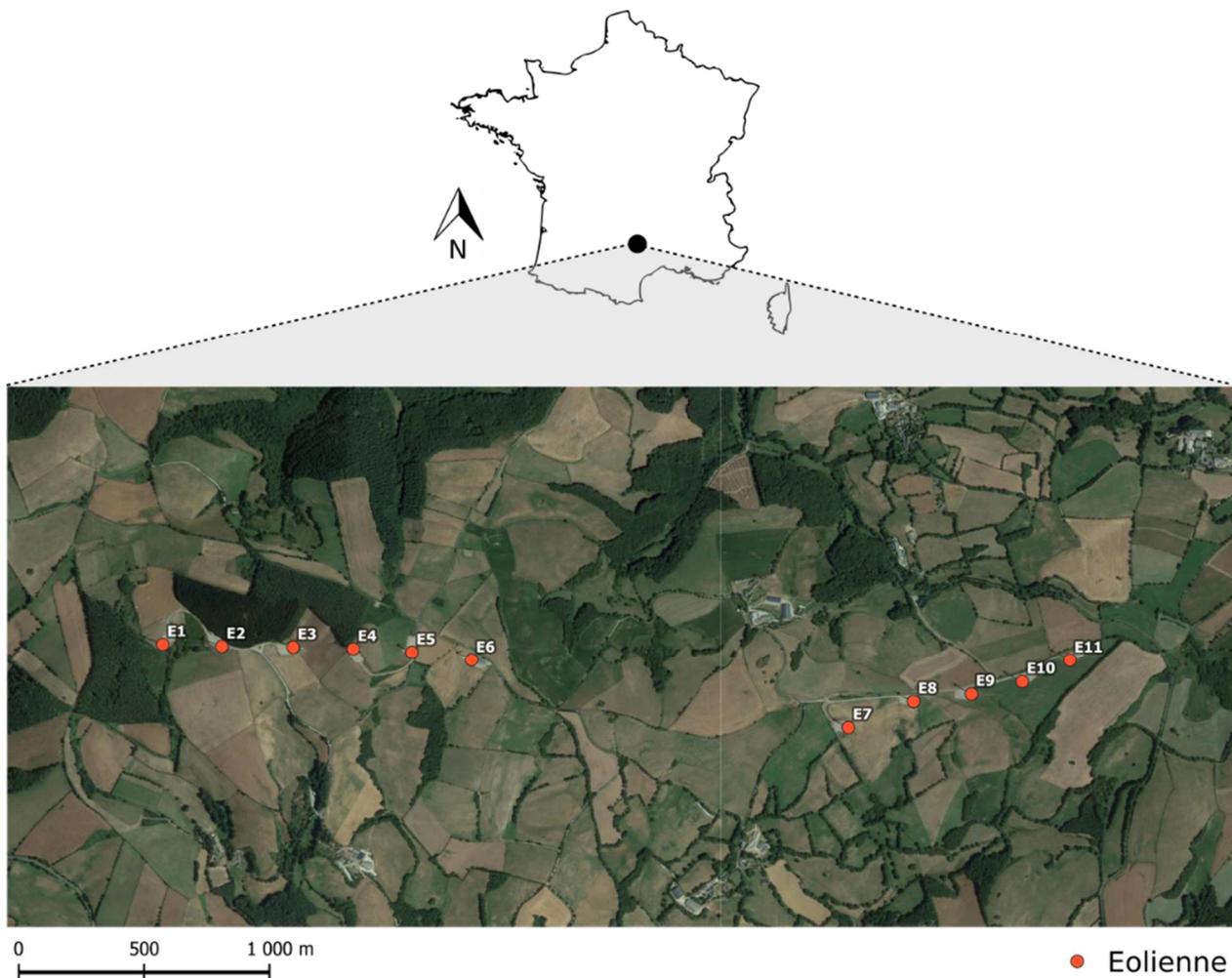


Figure 87 Localisation du parc d'Arques et des onze éoliennes étudiées

Le choix du protocole d'échantillonnage a été un compromis entre la recherche d'une forte représentativité statistique de l'échantillon pour l'extrapolation des résultats et la nécessité de bien maîtriser l'ensemble des facteurs d'influence à prendre en compte. Aussi, deux options ont été envisagées et comparées :

- **Concentrer l'ensemble des efforts sur un parc éolien présentant** une diversité de conditions de risques, garantissant ainsi une certaine puissance statistique pour détecter des effets, mais avec un potentiel de généralisation faible des résultats ;
- Ou bien **mener une étude sur plusieurs parcs éoliens**, permettant de diversifier les situations (modèles d'éoliennes et contextes biogéographiques et climatiques), mais avec le risque de diluer l'effort et de ne plus avoir aucune réponse significative statistiquement.

Le choix de l'une ou l'autre des options a été tranchée sur la base de :

- Critères logistiques et budgétaires : organisation des nombreux passages quotidiens de suivis de la mortalité, ou de maintenance d'enregistreurs à ultrasons à prévoir sur chaque site étudié, distances et frais de déplacement vis-à-vis du siège du bureau d'étude EXEN ;
- De critères de pertinence d'analyse statistique : la dilution de l'effort d'échantillonnage sur plusieurs parcs induit nécessairement une perte de puissance statistique à détecter des différences entre modes de régulation ;
- De critères organisationnels et de protocole : nécessité de comparer les effets de chaque modalité de régulation avec les autres au sein de chaque site, par groupes d'éoliennes, donc nécessité d'homogénéiser la planification des modes de régulation en amont. Tenir compte des risques liés à d'éventuels problèmes de maintenance et d'arrêt de fonctionnement de certaines éoliennes en cours de campagne ;

- Critères de représentativité des risques éoliens sur les chauves-souris : nécessité d'un site ou de deux sites qui présentent à la fois des risques de mortalités importants pour les chauves-souris, et une diversité des types de risques. Il est donc important de bénéficier d'un recul sur la situation chiroptérologique locale de chaque site pour faire un choix.

Au regard de l'ensemble de ces éléments, et des parcs proposés à l'étude par TotalEnergies (Total Quadran à l'époque), les partenaires se sont orientés vers la première solution de concentration des investigations sur un seul parc. Le parc en question est exploité par TotalEnergies en partie depuis 2017 (Arques 1 & 2 en activité depuis 2017 et Arques 2bis & 3 en activité depuis 2018. Il est situé dans l'Aveyron, à proximité du siège du bureau d'étude EXEN. Il bénéficie d'une première année de suivi environnemental dans le cadre de la réglementation ICPE menée sur la campagne 2018 qui confirme son intérêt comme site de test « complet ». Il bénéficie aussi d'une configuration qui semble intéressante pour mener les tests.

Une première analyse rapide des résultats de suivi de l'année 2018 de référence (Figure 88) confirme en effet que ce site bénéficie de conditions optimales pour la représentativité des conditions de risques pour les chauves-souris à savoir :

- Une **forte activité générale de chauves-souris, répartie entre mai et octobre** ;
- Une **diversité représentative du cortège d'espèces, aux comportements de vols variés** (notamment les familles des pipistrelles et des noctules, mais aussi Vespère de Savi) ;
- Une chronologie d'activité qui représente les **principaux types de risques** (activité régulière des espèces de lisières le long des corridors, pics d'activité ponctuels et massifs de pipistrelles en hauteur entre juin et fin juillet, activité saisonnière d'espèces de haut-vol et migratrices à l'automne, mais aussi activité plus régulière d'espèces de haut-vol sur l'ensemble de la campagne notamment de Noctule de Leisler) ;
- La **fréquentation d'espèces hautement patrimoniales** et sensibles (Grande noctule entre mai et septembre, Pipistrelle de Nathusius, etc.) ;
- Une **forte mortalité des chauves-souris** (n = 26 sur 24 jours de suivis) avant mise en place de mesures de régulation des éoliennes d'août à octobre pour réduire cette mortalité soit un taux de mortalités élevé, estimé entre 32 et 35 chauves-souris par éolienne et par an en prenant en compte les coefficients correcteurs. Cette mortalité est dominée par les pipistrelles avec une chronologie qui reflète la diversité des types de risques (pics ponctuels et mortalités régulières) ;
- Des **périodes de mortalités qui semblent assez bien correspondre aux principales périodes d'activité** (juin, juillet, août avant régulation préventive).

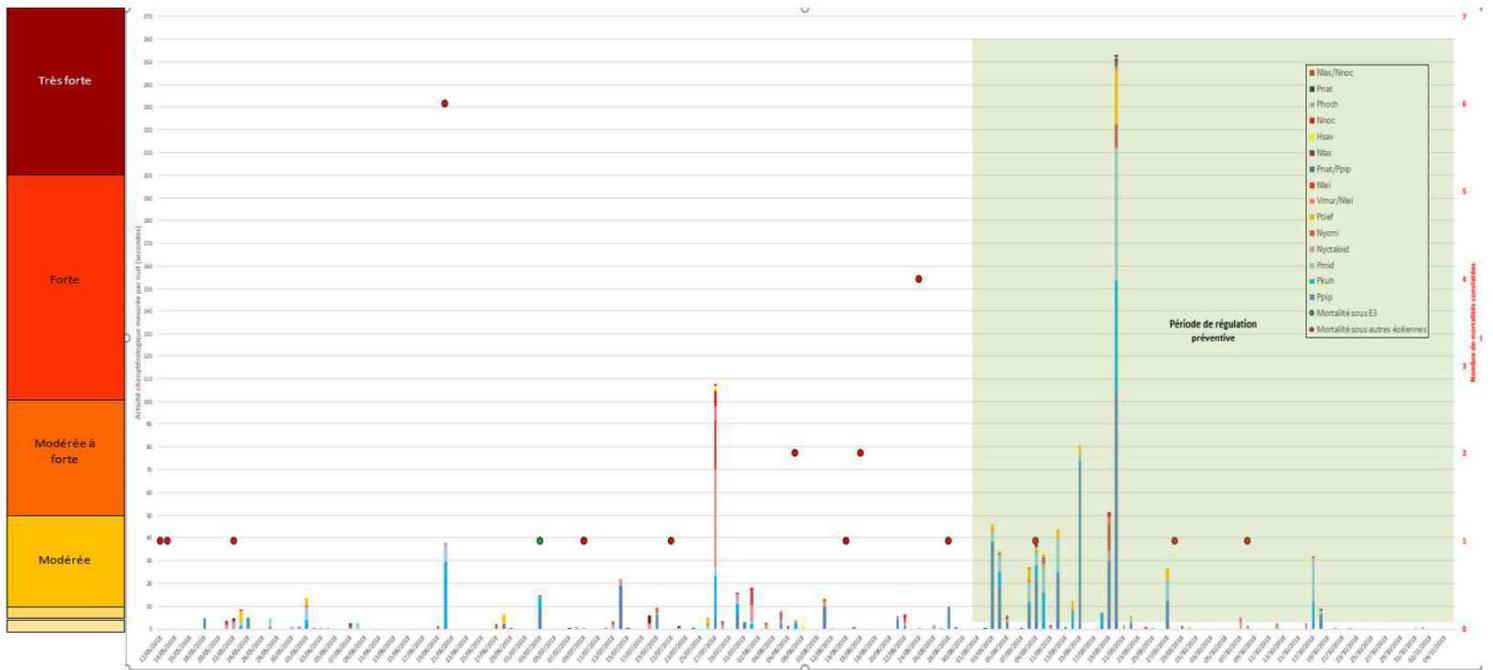


Figure 88 Chronologie d'activité acoustique des chauves-souris comparée aux relevés de mortalités sur le parc éolien d'Arques en 2018

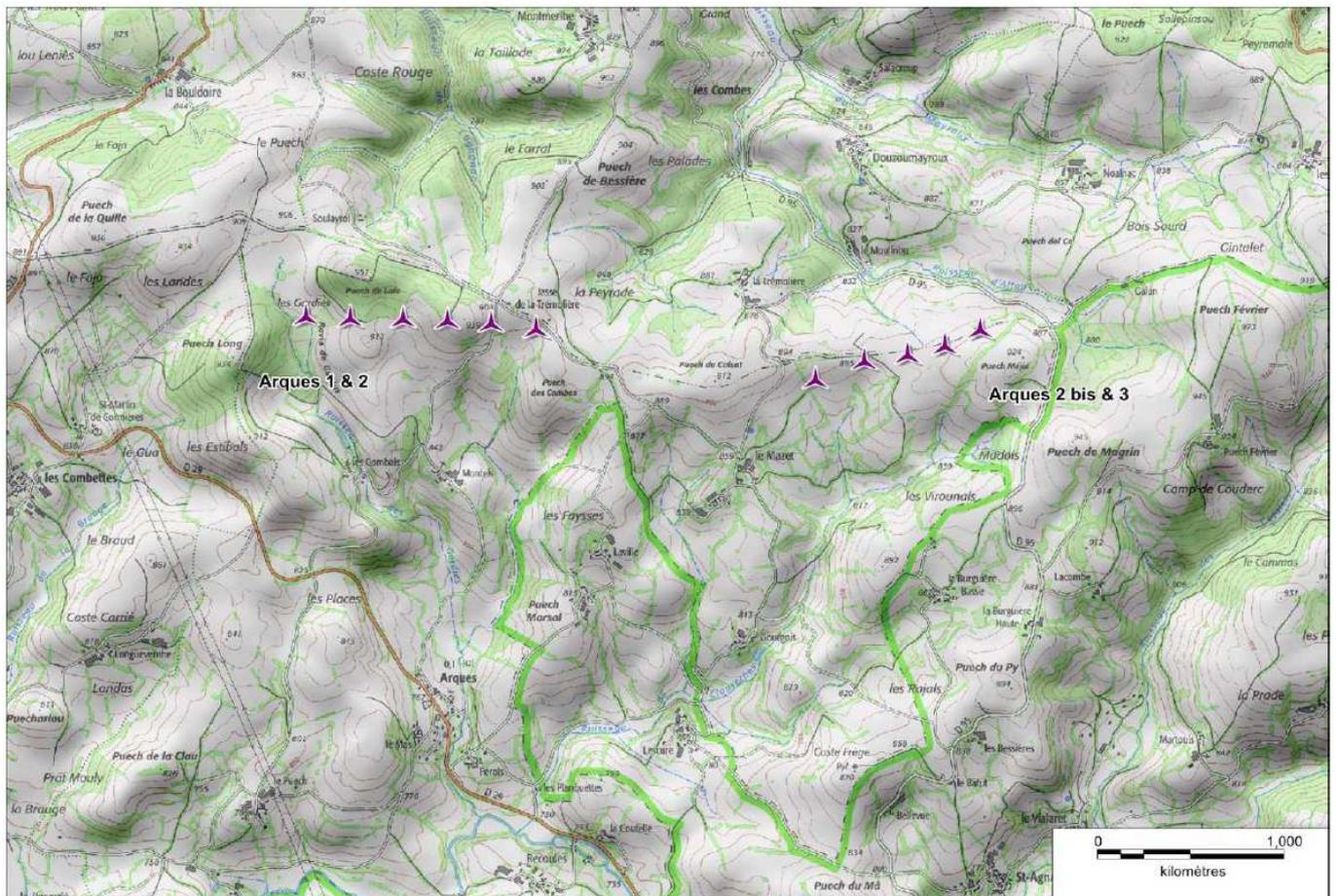


Figure 89 Configuration du parc d'Arques retenu comme site pilote pour les tests de régulation

3.1.3. Modèles de régulation testés

Quatre modalités de régulation et une modalité témoin (sans régulation) ont été mises en place avec une rotation aléatoire tous les quinze jours de ses modalités sur les onze éoliennes. Ce plan expérimental « tournant » est commun dans la littérature statistique pour évaluer l'efficacité relative de « traitements » différents sur une variable écologique d'intérêt. L'aspect tournant du plan d'échantillonnage permet en effet de minimiser l'impact de potentiels effets confondants dans le temps et dans l'espace. Il a par exemple déjà été utilisé pour la comparaison de l'effet de différentes stratégies de régulation sur la mortalité des chiroptères (Arnett and Baerwald 2013; Whitby et al. 2021).

Chaque modalité est définie par différentes valeurs seuils de mise en activité associées à une vitesse de vent et/ou à une température (Tableau 15). L'éolienne est régulée par une mise en drapeau en fonction des seuils définis. Dans ce cas, les vitesses de rotation restent inférieures à 2,5 tours par minute.

La **modalité témoin n° 1 ne présente aucune régulation**. Les pales ont une rotation lente et proportionnelle à la vitesse du vent jusqu'à un seuil d'entrée en production.

Les seuils de bridage des éoliennes régulées associés aux vitesses de vent ont été fixés à **3 m/s (mod02 ; seuil de production fictif), 4,5 m/s (mod03) et 6 m/s (mod04 et mod05)**. Ces seuils ont été choisis car ils présentent une forte variabilité de réduction de la mortalité rapportée dans la littérature variant de 10% à plus de 75% de réduction (entre 3,5 m/s et 6 m/s, Whitby et al. 2021).

De plus, les seuils de bridage de mod03, mod04 et mod05 incluent également des seuils de température de 10°C ou 15°C (Tableau 15). En effet, la température a un effet sur l'activité des chiroptères (Erickson and West 2002; Arnett et al. 2011) et une faible activité des espèces insectivores est généralement constatée pour des températures inférieures à 10°C (voir par exemple Martin et al. 2017 et Wolbert et al. 2014 en Amérique, Kusch and Idelberger 2005 en Europe). Martin et al. (2017) ont notamment constaté une réduction de la mortalité de 62% pour des seuils de vent inférieurs à 6 m/s et des températures supérieures à 9,5 °C.

A partir de ces résultats, nous avons défini trois combinaisons possibles avec deux seuils de vent et de température différents (Tableau 15).

Tableau 15 : Description des différentes modalités de régulation étudiées

Seuils			
	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

3.1.4. Relevés chiroptérologiques

Les relevés chiroptérologiques ont été réalisés par le bureau d'étude Exen **entre le 11 juillet et le 30 septembre 2019 (82 jours) et entre le 1^{er} juillet et le 30 septembre en 2020 (91 jours) soit un total de 173 jours de relevés comprenant (i) un suivi quotidien de la mortalité sous les onze éoliennes et (ii) un suivi acoustique automatisé de l'activité simultanément depuis la nacelle et au pied de chaque éolienne.**

Cette période comprend la fin de la période de reproduction, la dispersion des jeunes ainsi qu'une partie de la phase de migration automnale. Il s'agit d'une période à risque avec un taux de mortalité plus important

constaté au sein du parc étudié lors de suivis antérieurs post-implantation (2018). Le choix de cette période est également en adéquation avec d'autres suivis de mortalité réalisés en Europe et en Amérique du Nord (Arnett and Baerwald 2013; Rodrigues et al. 2014; Arnett et al. 2016; Thompson et al. 2017). En Allemagne, plusieurs études ont ainsi estimé qu'environ 90% des mortalités avaient lieu entre début juillet et fin septembre (Brinkmann et al. 2011; Lehnert et al. 2014).

3.1.4.1. Relevés des mortalités

La méthode de relevé employée se base sur la méthode standardisée développée par Winkelman (1989), en accord avec le protocole national standardisé pour le suivi des parcs éoliens terrestres révisé en 2018. **Chaque éolienne a fait l'objet d'un passage par jour, en journée, par au moins un observateur. La pression d'échantillonnage quotidienne permet de maximiser la détection des cadavres (peu de chance de rater un cadavre plusieurs jours d'affilés).**

La surface de recherche maximale est de forme **carrée de 100 m** de côté de manière à couvrir une surface circulaire de 50 m autour de l'éolienne définie en fonction de la taille des pales (pales de 35 m). En effet, Kerns, Erickson et Arnett (2005) montrent que près de 80% des carcasses se trouvent à l'intérieur de la moitié de la distance mesurée du bout de pale jusqu'au sol. De plus, cette surface de prospection correspond à la surface préconisée dans le protocole de suivi national (version révisée de 2018).

Les recherches de cadavres ont été effectuées sur des **transects parallèles espacés de 2 à 5 m en fonction du couvert végétal**. Celles-ci ont donc été concentrées dans les zones herbacées (moins de 60cm de hauteur) et les zones dépourvues de végétation. La surface de prospection varie d'une éolienne à l'autre d'environ 25 à 80 % de zones prospectables et varie également dans le temps (culture et prairie). Le temps de prospection réalisé par éolienne est de 30 min lorsque l'ensemble de la surface est accessible et est proportionnel à la taille de la zone accessible.

La mise en place d'un plan expérimental tournant des modalités de régulation avec témoin permet de comparer les mortalités observées brutes pour chaque modalité, sans correction pour les difficultés de détection et ou pour les temps de persistance des cadavres. Il s'agit en effet ici d'estimer non pas la mortalité brute mais l'impact relatif des différentes modalités de régulation. L'utilisation d'un plan d'échantillonnage tournant permet ainsi de maximiser les chances d'estimer précisément l'effet des modalités de régulation (en relatif) **sans passer par des estimations de détection et de persistance qui sont souvent peu précises et induisant beaucoup d'incertitudes.** Il permet également de **s'extraire de l'influence de certains paramètres environnementaux** propres à chaque éolienne (ex. variations des distances au bois). Il est donc à noter que les mortalités constatées représentent une sous-estimation des mortalités totales (notamment du fait des durées de persistance faibles des cadavres de chiroptères; Barrientos et al. 2018) et ne sont donc pas interprétables en valeur absolue. Une étude antérieure d'Exen (2018) a permis d'estimer un taux de persistance de 0,55 en moyenne sur le site.

Enfin, les **cadavres découverts ont été récoltés puis analysés de manière à identifier l'espèce et d'estimer la date de mortalité.** Afin de prendre en compte le risque d'erreur quant à la date de mortalité observée, les analyses ont été menées avec l'information sur la date de découverte du cadavre (c.a.d. considérant que l'évènement de mortalité a eu lieu la nuit précédant la découverte du cadavre) et avec une variable de mortalité corrigée à partir de la date de mortalité estimée après examen des cadavres (c.a.d. en considérant que certains évènements de mortalité avaient eu lieu la deuxième nuit précédant la découverte du cadavre).

3.1.4.2. Relevés acoustiques

Les relevés d'activité acoustique ont été réalisés avec deux détecteurs passifs de type GSM-Batcorder 1.0 par éolienne, posés au sol et au niveau de la nacelle orienté vers la partie basse du rotor. Ils ont été installés sur les onze éoliennes **du 1^{er} juin au 30 octobre 2019 et 2020 avec un déclenchement des enregistrements entre 18h et 8h** et un paramétrage homogène (Quality : 20 | Threshold : 27 dB | Posttrigger : 800 ms | Critical frequency : 14 kHz).

Par la suite, un traitement automatique puis manuel des enregistrements a permis l'identification acoustique des espèces ou des groupes d'espèces. Dans un premier temps, les enregistrements ont été traités automatiquement avec les logiciels *bcAdmin* 4.0 et *batdent* 1.5 (©ecoObs) utilisant des méthodes de classification topologique des signaux par comparaison avec une sonothèque du Paléartique occidental.

Dans un second temps, une analyse manuelle a été menée sur un échantillonnage de sons à l'aide du logiciel *bcAnalyze 3* (®ecoObs) afin de corriger et de valider les identifications. Au vu des difficultés d'identification de certaines espèces aux signatures acoustiques similaires (ex. groupe des *Myotis*, Sérotules, etc.) (Barataud 2015), certains sons ont été regroupés par famille acoustique sans distinction spécifique. L'ensemble des groupes utilisés pour la classification des signaux enregistrés est décrit en Annexe 4.

3.1.4.3. Définition de l'activité chiroptérologique

L'activité chiroptérologique a été mesurée par nuit (également par heure dans la partie 4.2) suivant : (1) le nombre de cris (*CRI*) (2), le temps d'enregistrement cumulé (*TMP*), (3) le nombre de séquences de cinq secondes positives (*SEC*) (cad avec au moins un contact par séquence de cinq secondes) et (4) le nombre de minutes positives (*MIN*) (cad avec au moins un contact par séquence d'une minute).

Deux autres métriques ont été ajoutées relatives à la **présence et aux nombres d'heures contenant au moins un pic d'activité par nuit**. Ces deux métriques ont été calculées selon deux seuils de pics distincts. Dans un premier temps, nous avons calculé le temps d'enregistrement cumulé total par heure pour chaque groupe étudié (*CHIRO* et *PIP*, voir ci-dessous). Pour chaque nuit, nous avons ensuite calculé le nombre d'heures dépassant deux seuils de temps d'enregistrement cumulé définis selon deux valeurs statistiques calculées sur l'ensemble du suivi : (5) le nombre d'heures par nuit au-dessus du temps cumulé d'enregistrement moyen observé (*PMEAM*) et (6) le nombre d'heures par nuit avec un temps cumulé d'enregistrement supérieur au troisième quartile (75%) (*P75*).

La résolution des données de mortalité est de 24h. De ce fait, le lien entre les mortalités et les variables explicatives (climat, activité et fonctionnement de l'éolienne) ne peut être testé qu'à cette échelle temporelle (parties 2, 3, 4.1 et 5). Les métriques ont été calculées pour chaque nuit (ex. activité globale pour l'ensemble de la nuit, moyennes des températures, etc.). Cependant l'analyse du lien entre variables météorologiques, de fonctionnement de l'éolienne et d'activité peut se réaliser à des échelles temporelles plus fines. Ceci nous a conduit à analyser en plus ces données à l'échelle horaire (résolution des données météorologiques). Notons que la durée de la nuit a été définie comme étant 30 minutes avant le coucher du soleil jusqu'à 30 min après le coucher du soleil afin de tenir compte des variations saisonnières (package *suncalc*, Thieurmél and Elmarhraoui 2019 sous le logiciel R, R Core Team 2021).

Seuls les groupes d'espèces les plus sensibles au développement éolien et/ou avec une mortalité locale avérée lors des suivis antérieurs ont été intégrés aux analyses acoustiques, à savoir le groupe des pipistrelles (groupe *PIP*) et les nyctaloïdes, regroupant les sérotines et les noctules, espèces de haut vol à forte intensité acoustique (groupe *NOC*) (Arnett et al. 2016). La composition des groupes acoustiques incluse dans la définition des groupes « *PIP* » et « *NOC* » est détaillée en Annexe 4. Des indices d'activité globaux ont également été calculés pour l'ensemble des espèces de chiroptères sans distinction (groupe « *CHIRO* »).

Les métriques *CRI* et *TMP* ont été calculées en additionnant l'ensemble des fichiers identifiés comme appartenant aux espèces ou groupe d'espèces incluent dans *CHIRO* (toutes espèces), *PIP* (pipistrelles) et *NOC* (nyctaloïdes). Les métriques *SEC* et *MIN* ont été calculées en agrégeant les espèces associées aux groupes étudiés, c'est-à-dire qu'une unité positive correspond à une unité (« minute » ou « 5-secondes ») avec au moins un contact appartenant à l'ensemble des espèces présentes dans les groupes *CHIRO*, *PIP* ou *NOC* respectivement.

3.1.5. Données météorologiques et de fonctionnement des éoliennes

Les données météorologiques et de fonctionnement de l'éolienne associées à la vitesse du vent, sa direction, la température, la vitesse de rotation des pales et la position de la nacelle ont été fournies par la société TotalEnergies pour chaque éolienne. Les données de précipitation et d'humidité de la station météorologique la plus proche (Séguir à 5 km du parc ; n° 12266002) ont été téléchargées sur le site de Météo-France (Tableau 16).

Tableau 16 : Description des variables utilisées pour la modélisation de l'activité et de la mortalité. La variable HEURE a été incluse dans les modèles d'activité intra-nuit seulement (résolution horaire). La variable DIRVT n'a été testée que dans la partie dédiée à l'étude de la mortalité (Partie 3).

Code variable	Description (unité)	Résolution spatiale	Résolution temporelle initiale
ROTOR	Moyenne de la vitesse de rotation des pales (km/h)	Eolienne	10 minutes
VENT	Moyenne de la vitesse du vent (km/h)	Eolienne	10 minutes
DIRVT	Position de la nacelle ou direction du vent (degrés)	Eolienne	10 minutes
TEMP	Moyenne de la température (°C)	Eolienne	10 minutes
PREC1	Hauteur de précipitation (mm)	10 km	1 heure
PREC2	Durée de précipitation (mm)	10 km	1 heure
DATE	Jour de l'année	-	-
ANNEE	Année de suivi (2019 ou 2020)	-	-
HEURE	Heure après le coucher du soleil	-	-

3.1.6. Analyses statistiques

3.1.6.1. Partie 1. Effet des différents modes de régulation sur la mortalité observée

Les relevés de mortalité ont été effectués après chaque nuit sous chaque éolienne. Il existe donc une structure particulière dans les données (*i.e.* les relevés effectués successivement sous la même éolienne ne sont pas indépendants, de même que les relevés effectués sur les différentes éoliennes la même nuit) et les relations entre les variables à expliquer (mortalité) et les variables explicatives peuvent différer en fonction de facteurs de regroupement (nuit et éolienne). Les observations au sein d'un même groupe (même éolienne ou même nuit) tendent en effet à être plus similaires que les observations effectuées dans des groupes différents, en raison de facteurs pouvant structurer les mortalités au niveau du groupe (au niveau de l'éolienne donc spatialement ou des nuits donc temporellement). La variation résiduelle de la réponse (non-expliquée par les variables explicative) n'est donc pas indépendante d'une observation à l'autre, ce qui est une hypothèse de base des modèles linéaires utilisés classiquement pour ce type d'analyses. De manière à tenir compte de cette structure groupée des données décrites ci-dessus et de la dépendance entre observations qu'elle induit, nous avons **modélisé les relations entre mortalité et modalités de régulation à l'aide d'un modèle linéaire généralisé à effets mixtes (GLMM)** (package *lme4*, Bates et al. 2021, sous R). Des effets aléatoires « éolienne » et « nuit » ont été inclus dans les modèles pour gérer cette éventuelle hétérogénéité spatiale des mortalités et la pseudo-réplication des relevés quotidiens sur chaque éolienne lors de chaque nuit (équation 1).

La mortalité a été décrite selon deux variables à expliquer : soit le nombre de cadavres détectés soit la présence ou absence d'au moins un cadavre par relevé. Ce choix de tester deux métriques se justifie par le faible nombre de cadavres (grande quantité de relevés à 0) qui peut générer des problèmes d'ajustement des modèles de type Poissonien sur les données de comptages. Pour les données associées au « nombre de cadavres », le GLMM est basé sur une distribution de Poisson et un lien *log* (équation 2). Pour les données de présence-absence de cadavres, le GLMM est basé sur une loi Binomiale et une fonction de lien *logit* (équation 3). L'utilisation d'une variable de mortalité corrigée (c.a.d. dire dont la date d'occurrence a été corrigée suivant l'ancienneté du cadavre) n'est ici pas nécessaire puisque les mortalités n'ont pas eu lieu dans les périodes de changement de modalité de régulation des éoliennes. Les observations *i* (de 1 à *n*) sont donc regroupées par nuit et pas éolienne (effet hiérarchique avec *j* éoliennes et *k* nuits) selon l'équation :

$$\eta = \beta_0 + \beta_{1x_1ijk} + (\dots) + \beta_{2x_2ijk} + \gamma_{0j} + \gamma_{0k} + \varepsilon_{ijk} \quad [\text{Equation 1}]$$

Avec

$$y \sim \text{Pois}(\lambda) ; \eta = \log(\lambda) \quad [\text{Equation 1a}]$$

ou

$$y \sim B(n, p) ; \eta = \log(p/(1 - p)) \quad [\text{Equation 1b}]$$

Avec x_n les covariables de coefficients de régression fixes β_n , β_0 l'ordonnée à l'origine fixe, γ_{0j} l'ordonnée à l'origine aléatoire pour chaque groupe j (éolienne), γ_{0k} l'ordonnée à l'origine aléatoire pour chaque groupe k (nuit), ε les erreurs associées à chaque observation (résidus) et $g(\cdot)$ la fonction de lien.

Les différences entre les modalités ont été testées deux à deux à l'aide de post-hoc tests d'analyse de contraste (ex. modalité 1 *versus* modalité 2, modalité 1 *versus* modalité 3, etc.) avec un ajustement des valeurs de significativité des tests pour gérer le fait que plusieurs tests soient réalisés (package *emmeans*; pairwise test avec un ajustement de Tukey, Lenth and Love 2015).

3.1.6.2. Partie 2. Effet de l'activité sur la mortalité

Pour tester la corrélation entre les différentes variables d'activité (*CRI*, *TPS*, *SEC*, *MIN*, *PMEAN* et *P75*) et la mortalité observée, nous avons utilisé des modèles additifs généralisés (GAM, Hastie and Tibshirani 1986) à effets aléatoires (GAMM, Lin and Zhang 1999) avec une fonction de lien de type *log* et une distribution de poisson ou une fonction de lien de type *logit* et une distribution binomiale suivant les métriques utilisées pour quantifier la mortalité (nombre de des cadavres ou présence-absence de d'au moins un cadavre sous une éolienne une nuit donnée). Les GAMM sont des modèles corrélatifs plus flexibles que les GLMM car ils ont l'avantage de permettre une relation non linéaire entre variables explicatives et variables à expliquer grâce à des fonctions de « lissage » (*spline*) (Hastie et Tibshirani 1986, Hastie et al. 2009). L'utilisation de degrés de lissage (k) relativement faibles (ici $k=4$) a également l'avantage d'éviter un sur-ajustement (*overfit*) du modèle (risque d'autant plus grand que le nombre de données est important mais celui de mortalités faible).

Un modèle a été réalisé pour chacune des variables explicatives potentielles puis l'ensemble des modèles a été comparé sur la base du coefficient de détermination, pseudo- R^2 ajusté. Le coefficient de détermination pseudo- R^2 ajusté mesure le pourcentage de variance dans les données que les effets fixes du GAMM expliquent. Un pseudo- R^2 ajusté proche de zéro signifie que le modèle n'explique aucunement la répartition des données de mortalités dans le temps et dans l'espace. Au contraire, un pseudo- R^2 ajusté proche de 1 signifie que la(les) variable(s) expliquent parfaitement la répartition spatiaux-temporelle des mortalités.

Dans cette partie, seules les données associées aux éoliennes « témoins » c'est à dire en période non-régulée ont été analysées (modalité 1).

3.1.6.3. Partie 3. Effet des variables météorologiques et de fonctionnement de l'éolienne sur la mortalité

Les analyses statistiques menées dans cette partie sont identiques à la partie 2 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 à savoir : moyenne des températures ($^{\circ}\text{C}$), moyenne de la vitesse du vent (m/s), précipitations cumulées (mm/nuit), humidité moyenne (%) et la moyenne de la vitesse de rotation des pales (tour/minute). La direction du vent dominant a été déterminée à partir de la position de la nacelle (direction en degrés) et calculée de deux manières : (1) une variable continue soit la moyenne directionnelle à l'aide du package *circular* (Lund et al. 2017) sous R (2) une variable catégorielle associée à la classe de vent dominante au cours de la nuit. L'ensemble de ces variables a été calculé à partir des données disponibles décrites dans le Tableau 16.

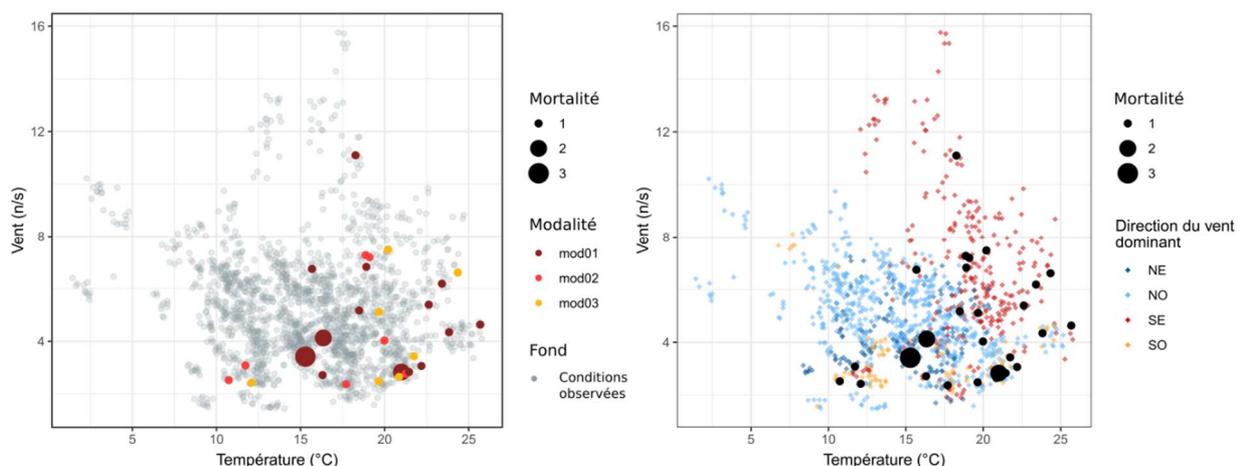
3.1.6.4. Partie 4. Effet des variables climatiques sur l'activité

Pour comprendre l'effet de différentes variables climatiques sur l'activité chiroptérologique, nous avons utilisé des 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). Contrairement aux parties précédentes dont la résolution des variables explicatives était contrainte par les données de mortalité, c'est-à-dire à l'échelle de la nuit, nous avons ici mené ces analyses à deux échelles temporelles : à l'échelle de la nuit (partie 4.1) et à une échelle horaire plus fines (métriques climatiques et d'activité calculée pour chaque heure ; partie 4.2). L'autocorrélation temporelle résiduelle étant élevée pour les analyses horaires (voir Annexe 13), nous avons intégré une structure de corrélation spécifique de type autorégressive d'ordre 1 (AR(1)) lors de la calibration des modèles. L'ensemble de ces analyses a été réalisé à l'aide du package *mgcv* (Wood 2021) sous R. Toutes les variables explicatives ont été centrée-réduites pour l'analyse.

3.2. Résultats (volet 2)

33 cadavres ont été découverts (18 en 2019 et 15 en 2020) lors de 29 jours de prospection sur les 173 jours effectués (Annexe 3). Parmi ces 33 cadavres, trois (9%) Noctules de Leisler, 21 (64%) Pipistrelle commune (*Pipistrellus pipistrellus*), six (18%) Pipistrelle 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 suivant des seuils de vent et de température (mod4 et mod5)**. Le nombre de cadavres étant globalement « faible », seul les groupes CHIRO (Chiroptères sp.) et PIP (Pipistrelles sp.) sont retenus pour les analyses incluant les données de mortalité (parties 1, 2 et 3). La répartition des mortalités le long de différents gradients étudiés est présentée Figure 90. Concernant l'activité (en nombre de séquences de 5 secondes positives), 65% et 19% des séquences enregistrées à la base de l'éolienne appartenaient aux groupe PIP et NOC respectivement. En nacelle, 48% des contacts enregistrés appartenaient au groupe NOC et 50% au groupe PIP. En nacelle, notons également la présence de 4% et de 1% des contacts identifiés comme appartenant aux espèces Grande noctule (*Nyctalus lasiopterus*) et Molosse de Cestoni (*Tadarida teniotis*) respectivement.

Les températures moyennes associées à des événements de mortalité sont comprises entre 10,7 °C et 25,7 °C (8,7 et 25,7 °C avec correction des dates de mortalité pour les cadavres anciens de plus de 24h) et les vitesses de vent entre 2,4 et 11,1 m/s. Notons que huit mortalités (24%) ont été rapportées malgré une vitesse de vent moyenne supérieures à 6 m/s pendant la nuit précédant la découverte du cadavre (cinq à neuf en corrigeant la date de mortalité), dont une Noctule de Leisler (cadavre frais) après un vent moyen de 11,1 ± 1,54 m/s (Annexe 3).



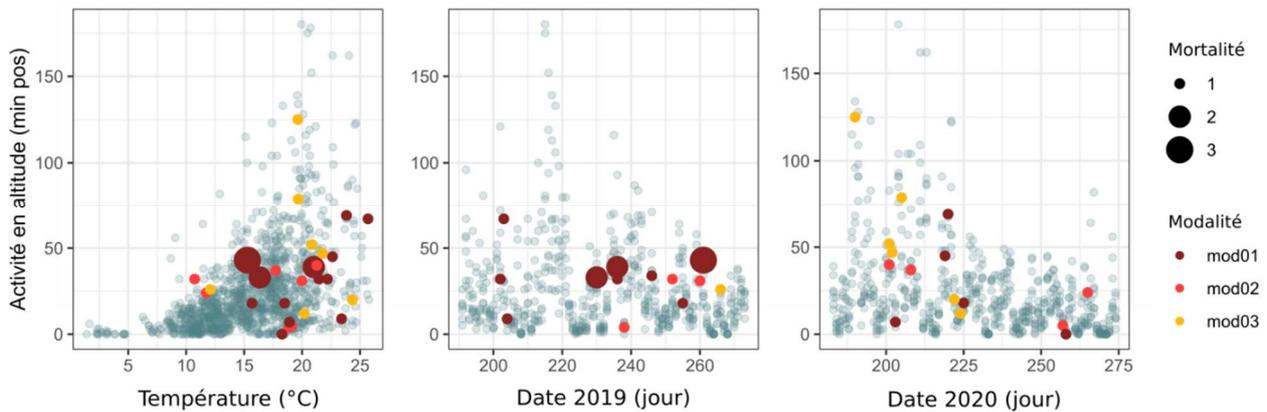


Figure 90 Répartition des données de mortalité suivant les modalités de régulation, les gradients de conditions météorologiques, d'activité en altitude et de phénologie observée pendant les suivis menés en 2019 et 2020. Les points gris clair représentent l'ensemble des conditions observées. Les données de mortalité regroupent toutes les espèces (trois noctules et 30 pipistrelles) par relevé journalier.

3.2.1. Partie 1. Effet des différents modes de régulation sur la mortalité observée

Au total, 19 cadavres (58%) ont été découverts sous les éoliennes non régulées, 17 appartenant au groupe *Pipistrellus sp.* et deux *Noctules* de Leisler.

Sept cadavres de *Pipistrellus sp.* ont été découverts sous les éoliennes régulées suivant la modalité 2 (arrêt de l'éolienne pour des vitesses de vent inférieures à 3 m/s) et sept cadavres de *Pipistrellus sp.* et un cadavre de *Noctules* de Leisler ont été collectés sous les éoliennes régulées suivant la 3^e modalité (arrêt de l'éolienne pour des vitesses de vent inférieures à 4,5 m/s et des températures supérieures à 10°C). Aucun cadavre de chiroptère n'a été découvert sous les éoliennes régulées selon les modalités 4 et 5 (éolienne régulée sous une vitesse de vent de 6 m/s et au-dessus de 10 et 15 °C respectivement).

Les résultats comparatifs de l'influence des modalités de régulation sur le nombre moyen de cadavre observés sont présentés Figure 91 (graphique de gauche) et en Annexe 5. Le nombre de cadavres moyen par nuit est de 0,018 CHIRO (95% IC : 0,010–0,037) et 0,012 PIP (95% IC : 0,006–0,025) pour la modalité 1, de 0,008 CHIRO (95% IC : 0,003–0,021) et 0,006 PIP (95% IC : 0,002–0,017) pour la modalité 2 et de 0,007 CHIRO (95% IC : 0,003–0,017) et 0,005 PIP (95% IC : 0,002–0,013) pour la modalité 3 (Figure 91).

La modalité 3 permet une réduction significative de 61% du nombre de cadavres découverts de CHIRO ($p < 0.1$) et 58% ($p < 0.1$) de PIP par rapport à des éoliennes non régulées.

La modalité 2 permet une réduction de 56% du nombre de cadavres découverts de CHIRO et 50% de PIP par rapport à des éoliennes non régulées. Les différences entre la modalité 2 et les modalités 1 ou 3 ne sont cependant pas significatives ($p > 0.1$).

Les modalités 4 et 5 ont permis une réduction 100% du nombre de cadavre observé.

Les résultats comparatifs de l'influence des modalités de régulation sur la probabilité d'observer au moins un cadavre sont présentés Figure 91 (graphique de droite) et Annexe 5.

La probabilité d'observer au moins un cadavre sous une éolienne non régulée est de 0,035 (CHIRO ; 95% IC : 0,021–0,057) et 0,014 (PIP ; 95% IC : 0,007–0,029).

La probabilité d'observer au moins un cadavre sous une éolienne régulée selon la modalité 2 est de 0,020 (CHIRO ; 95% IC : 0,010–0,041) et 0,009 (PIP ; 95% IC : 0,003–0,024) et de 0,016 (CHIRO ; 95% IC : 0,008–0,033) et 0,006 (PIP ; 95% IC : 0,002–0,017) pour la modalité 3.

Pour le groupe CHIRO, la probabilité d'observer au moins un cadavre sous une éolienne au cours d'une nuit diminue de 43% et de 54% ($p < 0,1$) pour les modalités 2 et 3 respectivement par rapport à des éoliennes non régulées.

Pour le groupe PIP, la probabilité d'observer au moins un cadavre sous une éolienne au cours d'une nuit diminue de 36% et de 57% pour les modalités 2 et 3 respectivement par rapport à des éoliennes non régulées. Les différences observées ne sont cependant pas significatives entre les groupes.

Enfin, les deux modalités sans cadavre observé (modalités 4 et 5) sont significativement plus efficaces que l'absence de régulation (modalité 1) pour réduire la mortalité observée (Figure 91).

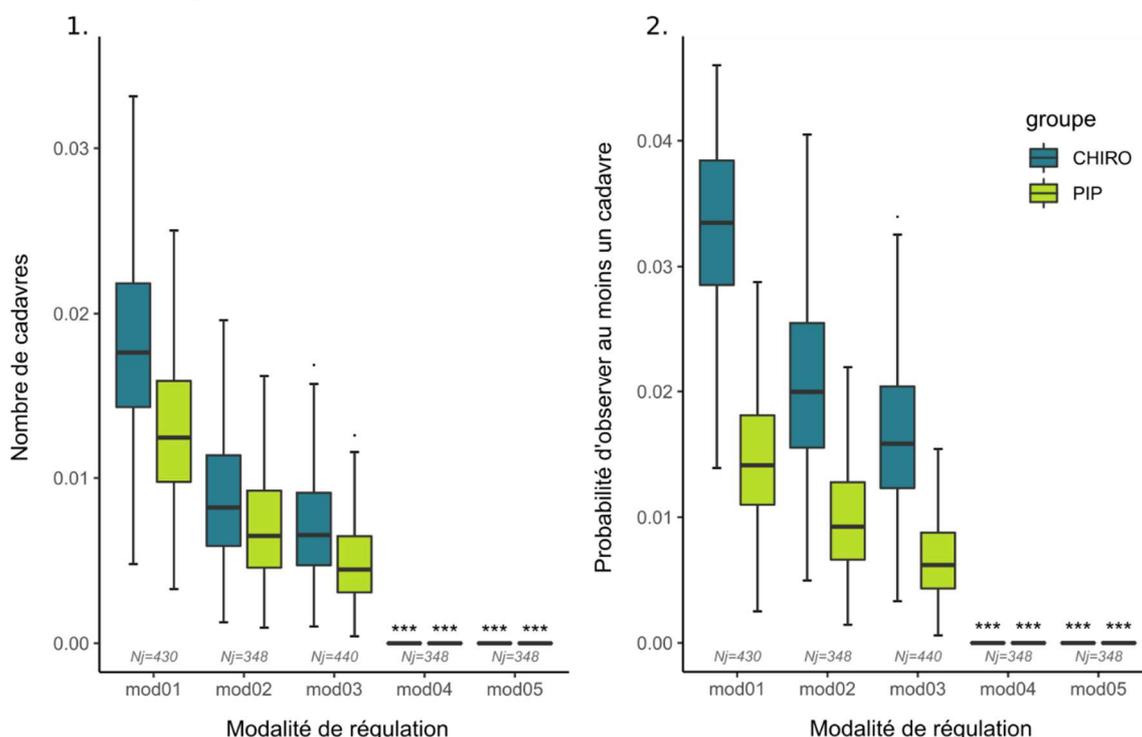


Figure 91. Distribution des estimations associées aux effets fixes de chaque modalité de régulation testée pour l'ensemble des espèces de chiroptères (CHIRO) et pour le groupe des pipistrelles (PIP). Ces coefficients issus de GLMM correspondent au nombre de cadavres par nuit prédit (1) et à la probabilité d'observer au moins un cadavre (2) sous une éolienne régulée selon les différentes modalités : mod01 (sans régulation) mod02 (régulation sous 3m/s de vent), mod03 (régulation sous 4,5 m/s de vent et au-dessus de 10°C), mod04 (régulation sous 6m/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 (* : $p < 0.05$).

A retenir de cette partie

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).

3.2.2. Partie 2. Effet de l'activité chiroptérologique sur la mortalité

Parmi les 30 cadavres de pipistrelles relevés, 13 ont été découverts au pied des éoliennes malgré une absence de contact acoustique en nacelle au niveau de l'éolienne concernée la nuit précédente (Annexe 6).

De même, parmi les trois cadavres de Noctule de Leisler découverts, une mortalité a été observée malgré une absence de contact avéré en nacelle au cours des trois nuits précédentes. L'utilisation d'une variable de mortalité corrigée à partir de la date de mortalité estimée permet de réduire ces incohérences. De ce fait, les résultats présentés ci-après concernent uniquement les données de dates de mortalité corrigées. Les résultats obtenus avec les données de mortalité brutes sont présentés en Annexe 7.

Tout d'abord, pour expliquer la mortalité à partir des indices d'activité en nacelle (groupe CHIRO et PIP), **seul le nombre de pics d'activité (P95) a un effet positif significatif ($p < 0,1$ et courbe de réponse CHIRO.NB6 Figure 5) sur la probabilité d'observer au moins un cadavre** (voir colonnes « CHIRO » et « PIP » de la partie « Nacelle » Tableau 17). Pour ces deux groupes, la variance expliquée par le modèle est cependant très faible ($R^2 = 0,1\%$ pour CHIRO et $R^2 = 0,0\%$ pour PIP). La courbe de réponse CHIRO.NB6 Figure 92 montre une augmentation de la probabilité d'observer au moins un cadavre dès le premier pic d'activité, associé à une forte augmentation de l'incertitude. Peu de nuits présentent en effet plus de deux heures avec au moins un pic d'activité en nacelle (voir graphique de densité CHIRO.NB6 Figure 92). Aucun modèle GAMMs utilisé pour prédire le nombre de cadavres ne présente de résultats significatifs pour les deux groupes étudiés (CHIRO et PIP) (Tableau 17, position « Nacelle », famille « Poisson »).

Une plus forte significativité des résultats et variance expliquée est cependant constatée lorsque l'activité est mesurée à la base de l'éolienne pour les deux groupes étudiés, avec des effets significatifs de l'activité mesurée en minutes positives et en nombre d'heures avec au moins un pic d'activité sur la mortalité (PMEAN et P75).

Concernant le groupe CHIRO, l'activité à la base de l'éolienne mesurée en minutes positives cumulées sur l'ensemble de la nuit a un effet significatif sur la probabilité d'observer au moins un cadavre d'une part, avec 1,2% de la variabilité expliquée ($p < 0,1$) et, d'autre part, sur le nombre total de cadavres ($p < 0,05$) avec 1,5% de la variabilité expliquée (Tableau 17).

Concernant le groupe PIP, l'activité à la base de l'éolienne mesurée en minutes positives cumulées sur l'ensemble de la nuit a un effet significatif sur la probabilité d'observer au moins un cadavre d'une part, avec 2,0% de la variabilité expliquée ($p < 0,05$) et, d'autre part, sur le nombre total de cadavres ($p < 0,01$) avec 1,9% de la variabilité expliquée (Tableau 17).

Les courbes de réponse associées au deux groupes présentées Figure 92 (BB2 et BP2 pour CHIRO et PIP) montrent une augmentation du nombre de cadavres et de la probabilité d'observer au moins un cadavre jusqu'à 45 et 50 minutes positives d'activité cumulée (pour PIP et CHIRO respectivement) sur l'ensemble de la nuit puis atteint un plateau et décroît, associé à une augmentation de l'intervalle de confiance. Les nuits avec plus de 50 minutes positives d'activité sont en effet rares comme l'indique la distribution des données selon le gradient d'activité présentée au-dessus des courbes de réponse Figure 92 (courbes de densité).

De plus **des effets significatifs du nombre d'heures avec au moins un pic d'activité (PMEAN et P95) sur le nombre de cadavres (CHIRO et PIP) et sur la probabilité d'observer au moins un cadavre (PIP) sont également avérés** avec une variance expliquée comprise entre 0,5% et 3,2% suivant la métrique utilisée (voir Tableau 17). Pour le groupe CHIRO, la courbe de réponse CHIRO.BP6 Figure 92 montre une augmentation du nombre de cadavres prédits lorsque que le nombre d'heures avec au moins un pic d'activité augmente, en particulier après quatre heures présentant au moins un pic d'activité par heure. Pour le groupe PIP, les courbes de réponse PIP.BP6 et PIP.BB6 Figure 92 montrent une augmentation du nombre de cadavres prédit lorsque que le nombre d'heures avec au moins un pic d'activité augmente jusqu'à trois heures, suivi d'une forte augmentation des intervalles de confiance. Les courbes de densité associées montrent que peu de nuits présentent au moins un pic d'activité durant plus de quatre heures au cours de la nuit. Une analyse complémentaire des liens entre activité au sol et en altitude est présentée Annexe 8.

Tableau 17 : Evaluation des différents modèles additifs généralisés à effets mixtes ajustés pour expliquer la mortalité sous les éoliennes non-régulées avec différentes variables d'activité mesurées en nacelle ou à la base de l'éolienne. Résultats obtenus à partir des données de mortalité dont la date a été corrigée à partir de l'ancienneté présumée des cadavres découverts. Les résultats obtenus sans correction des données sont présentés annexe 6. CHIRO : pour l'ensemble des espèces (Ncadavre=19) ; PIP : pour le groupe des pipistrelles seulement (Ncadavre=17). R² = pseudo-R²; F = statistique F ; p = valeur de p. En gras les modèles avec résultats significatifs (p<0,1). Code modèle : première lettre B = Base et N = nacelle ; deuxième lettre B = binomial suivi du numéro du modèle.

Position	Famille	code	Variable explicative	CHIRO			PIP		
				R ²	F	p	R ²	F	p
NACELLE	Poisson	NP1	temps d'activité cumulé	0	0,312	0,577	0,001	0,477	0,479
		NP2	minute positive	0	0,739	0,390	0	0,761	0,437
		NP3	5-secondes positives	0	0,271	0,603	0,002	0,762	0,390
		NP4	nombre total de cris	0	0,453	0,501	0	0,549	0,459
		NP5	nombre de pics (PMEAN)	0	1,678	0,196	0	0,472	0,492
		NP6	nombre de pics (> 3e quartile (75%))	0	1,860	0,173	0	2,266	0,133
	Binomial	NB1	temps d'activité cumulé	0	0,540	0,463	0,001	0,477	0,479
		NB2	minute positive	0	0,654	0,691	0	0,634	0,437
		NB3	5-secondes positives	0	0,226	0,801	0	0,824	0,594
		NB4	nombre total de cris	0	0,647	0,422	0	1,167	0,520
		NB5	nombre de pics (PMEAN)	0,001	2,414	0,121	0	0,942	0,332
		NB6	nombre de pics (P75)	0,001	2,968	0,086	0	2,766	0,097
BASE	Poisson	BP1	temps d'activité cumulé	0	0,434	0,510	0	0,761	0,384
		BP2	minute positive	0,015	5,534	0,032	0,019	10,346	0,006
		BP3	5-secondes positives	0	0,816	0,367	0	1,101	0,264
		BP4	nombre total de cris	0	0,488	0,485	0	0,437	0,509
		BP5	nombre de pics (PMEAN)	0,005	6,122	0,014	0,024	11,846	0,005
		BP6	nombre de pics (P75)	0,010	8,782	0,003	0,032	11,983	0,005
	Binomial	BB1	temps d'activité cumulé	0	0,003	0,959	0	0,782	0,377
		BB2	minute positive	0,012	3,244	0,081	0,020	7,525	0,014
		BB3	5-secondes positives	0	0,801	0,371	0,006	1,612	0,208
		BB4	nombre total de cris	0	0,553	0,458	0	0,073	0,787
		BB5	nombre de pics (PMEAN)	0	1,739	0,187	0,016	9,005	0,003
		BB6	nombre de pics (P75)	0	1,968	0,161	0,025	9,766	0,009

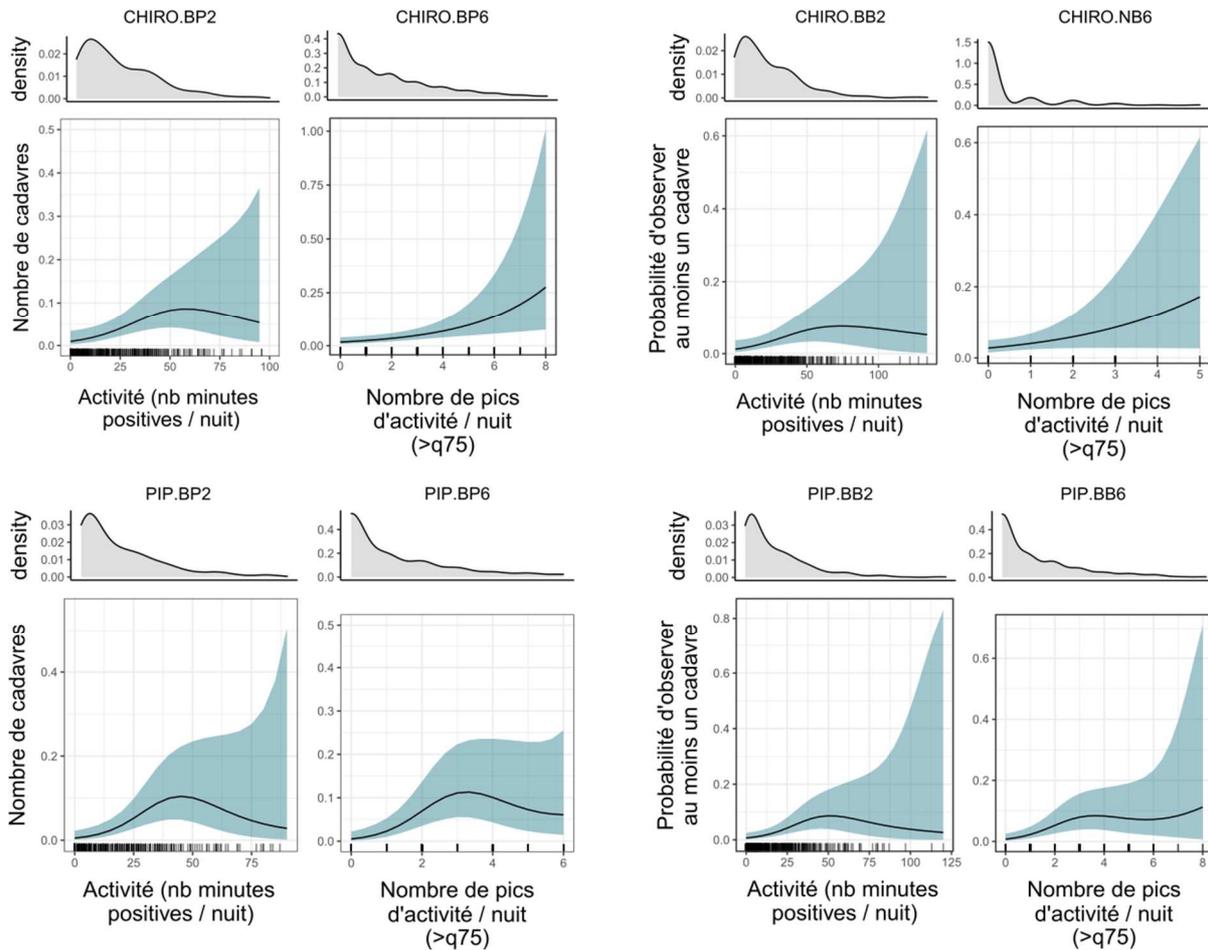


Figure 92. Effets de l'activité chiroptérologique sur le nombre de cadavres et la probabilité de découvrir au moins une mortalité.

Courbes de réponse des huit modèles GAMMs les plus parcimonieux avec effets significatifs. CHIRO : pour l'ensemble des espèces ($N_{\text{cadavre}}=19$) ; PIP : pour le groupe des pipistrelles seulement ($N_{\text{cadavre}}=17$). 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, PIP.BP2 et PIP.BB5 ont été ajustées pour améliorer la visibilité (valeurs maximales). La distribution des données utilisées est présentée au-dessus des courbes de réponses.

A retenir de cette partie

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.

3.2.3. Partie 3. Effet de des variables météorologiques, temporelles et de fonctionnement de l'éolienne sur la mortalité

Les températures moyennes associées à des événements de mortalité sont comprises entre 10,7 °C et 25,7 °C (8,7 et 25,7°C avec les dates de mortalité corrigée pour l'état du cadavre) et les vitesses de vent sont comprises entre 2,4 et 11,1 m/s (voir Figure 90 et Annexe 9). Parmi l'ensemble des modèles GAMMs testés présenté Tableau 18, **seules la température et la vitesse du rotor ont des effets significatifs sur la mortalité** au sein des deux groupes (CHIRO et PIP). En premier lieu, la température a un effet positif sur la probabilité d'observer au moins un cadavre avec 3,6% et 3,1% de variation expliquée par les modèles « température » pour CHIRO et PIP respectivement ($p < 0,001$ pour CHIRO et $p = 0,001$ pour PIP). Les effets de la température sur le nombre de cadavres observés est également significatif pour les deux groupes avec un taux de 1,7%

($p=0.002$) et 1,4% ($p=0.005$) de variation expliquée pour CHIRO et PIP respectivement. Les courbes de réponses associées aux modèles les plus parcimonieux sont présentées en Figure 93. Globalement, la probabilité d'observer au moins un cadavre et le nombre de cadavres moyen sont faibles en dessous de 10°C, augmente très légèrement entre 10 et 15°C et s'accroît plus fortement après 15°C.

L'effet de la vitesse du rotor sur la mortalité est plus imprécis mais plus significatif que les celui de la vitesse du vent seulement. Pour le groupe CHIRO, on observe un effet globalement négatif de la vitesse du rotor sur la mortalité (pseudo- R^2 très faible compris entre 0,1% et 0,3%). La probabilité de découvrir au moins un cadavre et le nombre de cadavre diminue lorsque la vitesse du rotor augmente, avec une plus forte variabilité des résultats pour des vitesses de rotor comprises entre 0 et 6 tr/min. Les résultats obtenus pour PIP sont similaires mais l'effet de la vitesse du rotor n'est significatif que sur la probabilité de découvrir au moins un cadavre. Enfin, l'amplitude et la force de l'effet de la vitesse du rotor sur la mortalité sont moins élevées que celles de l'effet de la température. Ces résultats ne sont significatifs qu'avec les données de dates de mortalité corrigées (voir Annexe 9).

Tableau 18 : Evaluation des différents modèles additifs généralisés à effets mixtes réalisés pour expliquer la mortalité sous les sous les éoliennes non-régulées avec différentes variables météorologiques, temporelles et de fonctionnement de l'éolienne.

Résultats obtenus à partir des données de mortalité dont la date a été corrigée à partir de l'ancienneté présumée des cadavres découverts. Les résultats obtenus sans correction des données sont présentés en Annexe 9. CHIRO : pour l'ensemble des espèces (Ncadavre=19) ; PIP : pour le groupe des pipistrelles seulement (Ncadavre=17). R^2 = pseudo- R^2 ; F = statistique F (test de calibration) ; p = valeur de p ; En gras les modèles qui présentent des résultats significatifs.

Famille	Code	Variable explicative	CHIRO			PIP		
			R ²	Chi ²	p	R ²	Chi ²	p
Poisson	P1	vent	0	2,027	0,681	0,006	3,964	0,470
	P2	vitesse du rotor	0,001	3,567	0,060	0	0,736	0,391
	P3	température	0,017	9,616	0,002	0,014	7,913	0,005
	P4	direction du vent	0	0,054	0,817	0	0,278	0,598
	P5	précipitation (heure)	0	0,301	0,583	0	0,154	0,695
	P6	précipitation (mm)	0	0,209	0,648	0	0,119	0,730
	P7	date::2019	0	0,035	0,851	0	0,343	0,558
		date::2020		0,037	0,848		0,399	0,528
Binomial	B1	vent	0,003	1,373	0,242	0	0,467	0,494
	B2	vitesse du rotor	0,003	3,431	0,065	0,003	3,633	0,057
	B3	température	0,036	12,469	0,000	0,031	10,457	0,001
	B4	direction du vent	0,004	0,547	0,534	0,005	0,577	0,439
	B5	précipitation (heure)	0,000	0,817	0,367	0	0,540	0,463
	B6	précipitation (mm)	0	0,505	0,478	0	0,361	0,548
	B7	date::2019	0	0,000	0,999	0	0,033	0,855
		date::2020		0,013	0,925		0,603	0,438

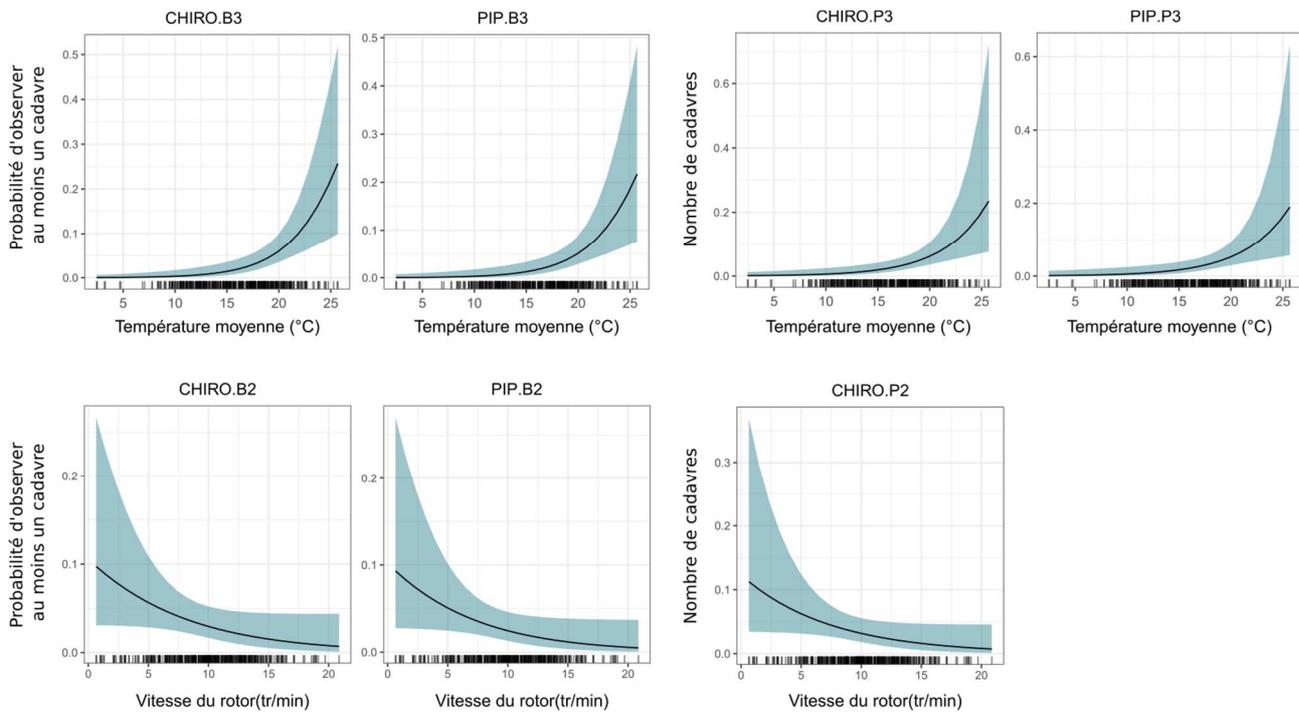


Figure 93. Effets de la température et de la vitesse du rotor sur la probabilité d'observer au moins une mortalité.

Courbes de réponse des modèles GAMMs avec effets significatifs. CHIRO : pour l'ensemble des espèces ($N_{\text{cadavre}}=19$) ; PIP : pour le groupe des pipistrelles seulement ($N_{\text{cadavre}}=17$). Code modèle : première lettre B = Binomial suivi du numéro du modèle (se référer au Tableau 18).

A retenir de cette partie

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

3.2.4. Partie 4. Effet des variables climatiques sur l'activité

3.2.4.1. Résolution temporelle de 24h

Tout d'abord, nous pouvons souligner un meilleur pouvoir explicatif des modèles (augmenter les valeurs du coefficient de détermination pseudo- R^2) lorsque l'activité est définie en nombre de minutes positives ou en présence-absence de contact par nuit plutôt qu'en nombre total de cris enregistrés par nuit pour l'ensemble des groupes étudiés (PIP, NOC et CHIRO). Ainsi, la variable de réponse d'activité retenue est MIN (nombre de minutes positives) pour les analyses de l'activité à la base de l'éolienne et NUIT (probabilité de détecter au moins un individu pendant la nuit) pour les analyses d'activité en nacelle (Tableau 19).

Tableau 19 : Evaluation des différents modèles additifs généralisés à effets mixtes réalisés pour expliquer la mortalité sous les éoliennes non-régulées avec différentes variables météorologiques et temporelles.

Résultats obtenus pour les données associées aux éoliennes témoins (mod01). Les résultats obtenus sur l'ensemble des éoliennes sont présentés en Annexe 10. CHIRO : pour l'ensemble des espèces ; PIP : pour le groupe des pipistrelles seulement. R² = Pseudo-R² ; AICc : Critère d'information d'Akaike corrigé. En gras les modèles les plus parcimonieux basés sur les valeurs d'AICc (delta AICc > 4).

Mesure de l'activité	Variable d'activité	Variables explicatives	Groupe d'espèces					
			CHIRO		PIP		NOC	
			R ²	AICc	R ²	AICc	R ²	AICc
BASE	SEC	temp + vent	0,20	16534	0,19	14812	0,03	9044
		temp + vent + date*année	0,25	16521	0,24	14795	0,08	8987
		temp + vent + pluie	0,20	16532	0,19	14814	0,03	8926
		temp + vent + date*année + pluie	0,24	16522	0,23	14798	0,08	8874
	MIN	temp + vent	0,42	14973	0,42	13286	0,04	7885
		temp + vent + date	0,46	14957	0,47	13266	0,14	7805
		temp + vent + pluie	0,41	14971	0,41	13288	0,04	7777
		temp + vent + date*année + pluie	0,46	14958	0,47	13269	0,15	7700
	NUIT	temp + vent	0,33	311	0,46	571	0,07	1900
		temp + vent + date	0,33	318	0,46	574	0,15	1844
		temp + vent + pluie	0,37	307	0,47	572	0,09	1870
		temp + vent + date*année + pluie	0,38	314	0,47	575	0,16	1816
NACELLE	SEC	temp + vent	0,04	8749	0,01	4541	0,10	7592
		temp + vent + date*année	0,06	8720	0,02	4517	0,12	7568
		temp + vent + pluie	0,04	8753	0,01	4542	0,10	7511
		temp + vent + date*année + pluie	0,06	8724	0,02	4519	0,13	7489
	MIN	temp + vent	0,13	7286	0,05	3559	0,13	6316
		temp + vent + date*année	0,18	7251	0,08	3535	0,19	6290
		temp + vent + pluie	0,13	7291	0,05	3560	0,13	6243
		temp + vent + date*année + pluie	0,18	7255	0,08	3537	0,20	6218
	NUIT	temp + vent	0,20	1936	0,18	1423	0,16	2108
		temp + vent + date*année	0,24	1913	0,27	1396	0,20	2089
		temp + vent + pluie	0,21	1938	0,19	1424	0,16	2087
		temp + vent + date*année + pluie	0,25	1914	0,28	1397	0,20	2069

Globalement, les modèles intégrant les variables de température, de vitesse de vent et la date de relevé par année (2019 et 2020) incluant ou non une variable associée à la pluviométrie (précipitations cumulée) sont les modèles les plus parcimonieux basés sur les valeurs d'AICc pour l'ensemble des groupes PIP et CHIRO. Pour NOC, les modèles intégrant les variables de température, de vitesse de vent et la date de relevé par année et la pluviométrie sont sélectionnés quelques soit la position du détecteur (base ou nacelle) ou les variables d'activité utilisée comme variable de réponse (voir Tableau 19). Ce dernier modèle sera donc choisi pour l'ensemble des groupes étudiés et détaillé ci-après (Figure 91 et Tableau 20).

Concernant le groupe CHIRO, le modèle sélectionné explique 46% de la variabilité des données d'activité mesurées à la base de l'éolienne et 25% en nacelle (Tableau 20). A la base de l'éolienne, l'activité est expliquée significativement par la température ($p < 0.001$) et la vitesse du vent ($p < 0.001$), puis par la date avec une variation de la significativité et du sens de la relation entre 2019 et 2020 et les précipitations cumulées, avec un effet significatif négatif des précipitations sur l'activité plus faible ($p < 0,1$) et des intervalles de confiance plus élevés (Tableau 20 et Figure 91). L'activité augmente fortement à partir de 10°C (moyenne de 5 contacts prédits), atteint un point d'inflexion autour de 16°C (moyenne de 18 contacts prédits) puis croît plus faiblement à partir 21°C (moyenne de 30 contacts prédits) associé à une augmentation des intervalles de confiance. L'activité diminue fortement lorsque la vitesse du vent augmente avec une relation quasi-linéaire pour des vitesses de vents comprises entre 1 m/s et 9 m/s. Dans cet intervalle, l'activité diminue d'environ 10% par accroissement d'unité de vitesse de vent. Au-dessus d'une vitesse de vent de 11 m/s, l'activité prédite est presque nulle. En nacelle, seule la vitesse du vent, la température et la date (pour l'année 2019 seulement) ont un effet significatif sur l'activité. Pour ces trois variables, les courbes de réponses sont similaires aux

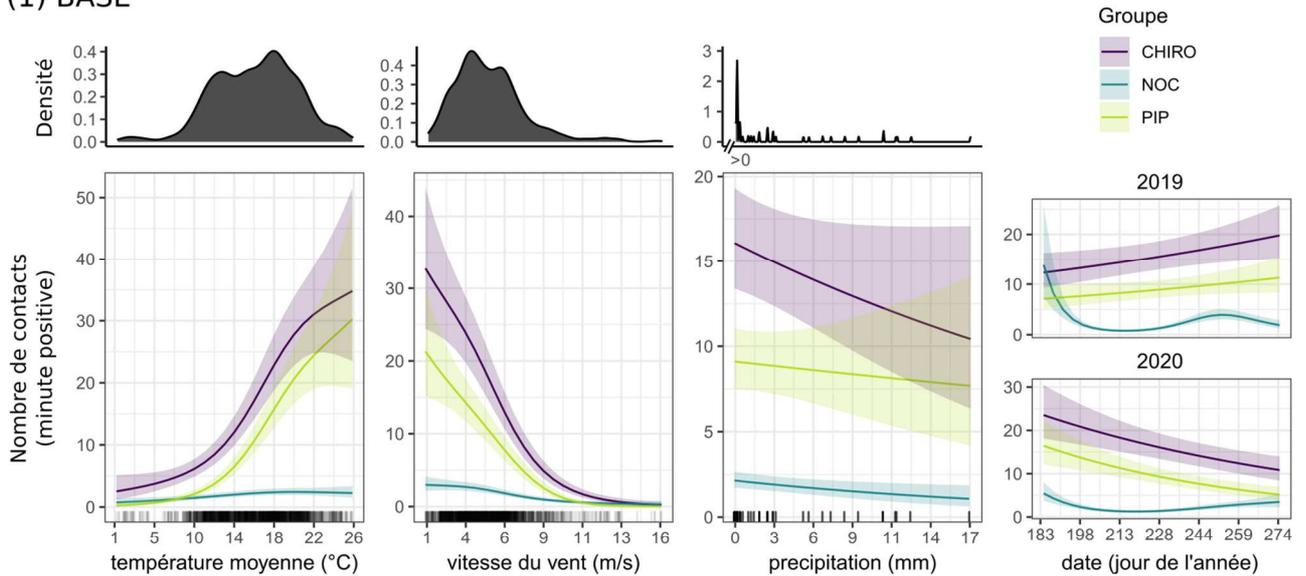
résultats obtenus avec les relevés effectués au sol. La probabilité de contacter un individu du groupe CHIRO atteint 0,5 pour une température de 14°C et une vitesse de vent de 6 m/s. La forme des courbes de réponse montre cependant une sensibilité légèrement plus importante de l'activité aux variations de température et de vitesse de vent en nacelle.

Concernant le groupe PIP, le modèle sélectionné explique 47% de la variabilité des données d'activité mesurées à la base de l'éolienne et 28% en nacelle (Tableau 20). La significativité des variables est similaire au groupe CHIRO ainsi que les courbes de réponse associées aux nombres de contacts au sol. En nacelle cependant, on observe un léger décalage des courbes de réponse par rapport à l'activité au sol. La probabilité de contacter au moins une pipistrelle est très faible pour des températures inférieures à 14°C ($p < 0,05$) puis augmente de manière exponentielle ($p < 0,001$). Au contraire, la probabilité de contacter au moins une pipistrelle décroît de manière exponentielle jusqu'à une vitesse de vent de 6m/s (probabilité inférieure à 0,05). Enfin, l'activité prédite en nacelle est marquée par une forte augmentation le dernier mois de suivi de 2019 ($p < 0,001$; résultats non significatifs pour 2020).

Concernant le groupe NOC, le modèle sélectionné explique 15% de la variabilité des données d'activité mesurées à la base de l'éolienne et 20% en nacelle (Tableau 20). Toutes les variables, y compris les précipitations, expliquent l'activité au sol de manière significative. Les effets observés et les courbes de réponses (base et nacelle) sont similaires au groupe CHIRO à l'exception de l'effet de la date sur l'activité. En effet, l'activité au sol est marquée par une activité plus élevée au début du suivi (juillet), qui diminue au cours du temps et qui est marqué par un pic le dernier mois de suivi (septembre). En nacelle cependant, la probabilité de contacter un individu du groupe NOC augmente fortement de 0,25 à 0,80 au cours du suivi pour l'année 2019 (résultats non significatifs pour 2020).

Pour l'ensemble des groupes, l'effet des précipitations est plus incertain, en particulier pour des précipitations cumulées supérieure à 3 mm (intervalles de confiances élevés et faible significativité). Globalement, les précipitations ont un effet négatif significatif sur l'activité mesurée au sol des groupes NOC ($p < 0,05$) et CHIRO ($p < 0,1$) et un effet négatif faiblement significatif pour le groupe PIP mesuré en nacelle. Les événements pluvieux au-dessus de 1mm de pluies cumulées ont cependant été assez rares lors du suivi.

(1) BASE



(2) NACELLE

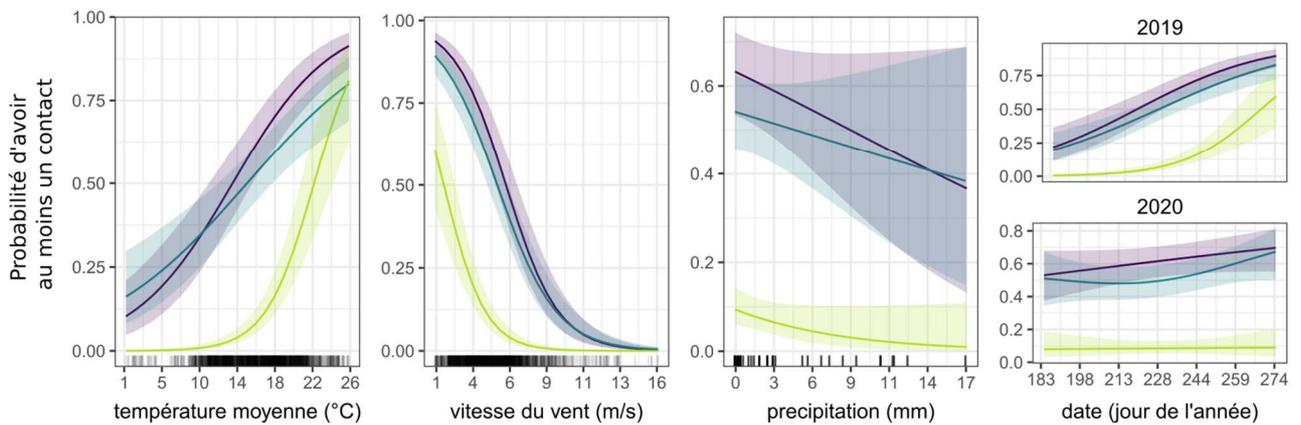


Figure 94. Effets des variables climatiques et de la date sur l'activité chiroptérologique à la base des éoliennes et en altitude.

Résultat du modèle GAMM le plus parcimonieux basés sur les valeurs d'AICc présentées Table 5 puis sur la cohérence écologique des courbes de réponse (si delta AICc < 4).

Tableau 20 : Résultats des différents modèles additifs généralisés à effets mixtes les plus parcimonieux réalisés pour expliquer l'activité à la base et au niveau de la nacelle avec différentes variables météorologiques et temporelles calculées à l'échelle de la nuit.

CHIRO : pour l'ensemble des espèces ; PIP : Pipistrelles sp. ; NOC : nyctaloïdes. R^2 = pseudo- R^2 ; F = statistique F (test de calibration) ; p = valeur de p ; En gras les modèles qui présentent des résultats significatifs. Résolution des variables : nuit

Position	Variable de réponse	Variabiles explicatives	edf	chi ²	p		
BASE	Activité CHIRO (minutes positives) ^a <i>Pseudo-R²= 0,46</i>	Température	2,7	210,6	0,000	***	
		Vitesse du vent	2,6	325,6	0,000	***	
		Date :					
		2019	1,0	5,4	0,020	*	
		2020	1,0	17,3	0,000	***	
		Précipitation	1,0	3,1	0,079	.	
	Activité PIP (minutes positives) ^a <i>Pseudo-R²= 0,47</i>	Température	2,6	287,5	0,000	***	
		Vitesse du vent	2,7	223,5	0,000	***	
		Date :					
		2019	1,0	3,3	0,067	.	
		2020	1,0	25,2	0,000	***	
		Précipitation	1,0	0,3	0,581	ns	
	Activité NOC (minutes positives) ^a <i>Pseudo-R²= 0,15</i>	Température	2,2	20,8	0,000	***	
		Vitesse du vent	2,6	106,4	0,000	***	

		Date :	2019	3,0	102,5	0,000	***
			2020	2,9	49,8	0,000	***
		Précipitation		1,0	6,5	0,011	*
NACELLE	Activité CHIRO (présence/absence) ^b <i>Pseudo-R²= 0,25</i>	Température		1,0	49,7	0,000	***
		Vitesse du vent		1,0	129,4	0,000	***
		Date :	2019	1,0	33,2	0,000	***
			2020	1,0	2,1	0,150	<i>ns</i>
		Précipitation		1,0	2,5	0,111	<i>ns</i>
		Température		1,0	64,0	0,000	***
	Activité PIP (présence/absence) ^b <i>Pseudo-R²= 0,28</i>	Vitesse du vent		1,0	65,6	0,000	***
		Date :	2019	1,0	36,1	0,000	***
			2020	1,0	0,0	0,882	<i>ns</i>
		Précipitation		1,0	3,2	0,072	.
		Température		1,0	24,4	0,000	***
		Vitesse du vent		1,0	112,5	0,000	***
Activité NOC (présence/absence) ^b <i>Pseudo-R²= 0,20</i>	Date :	2019	1,0	27,7	0,000	***	
		2020	1,5	1,5	0,202	<i>ns</i>	
	Précipitation		1,0	1,0	0,329	<i>ns</i>	

^a GAMMS avec une distribution Négative binomiale

^b GAMMS avec une distribution Binomiale

edf degrés de liberté effectif

chi² valeur de Chi² pour chaque terme lisse

*** p < 0,001

** p < 0,05

* p < 0,01

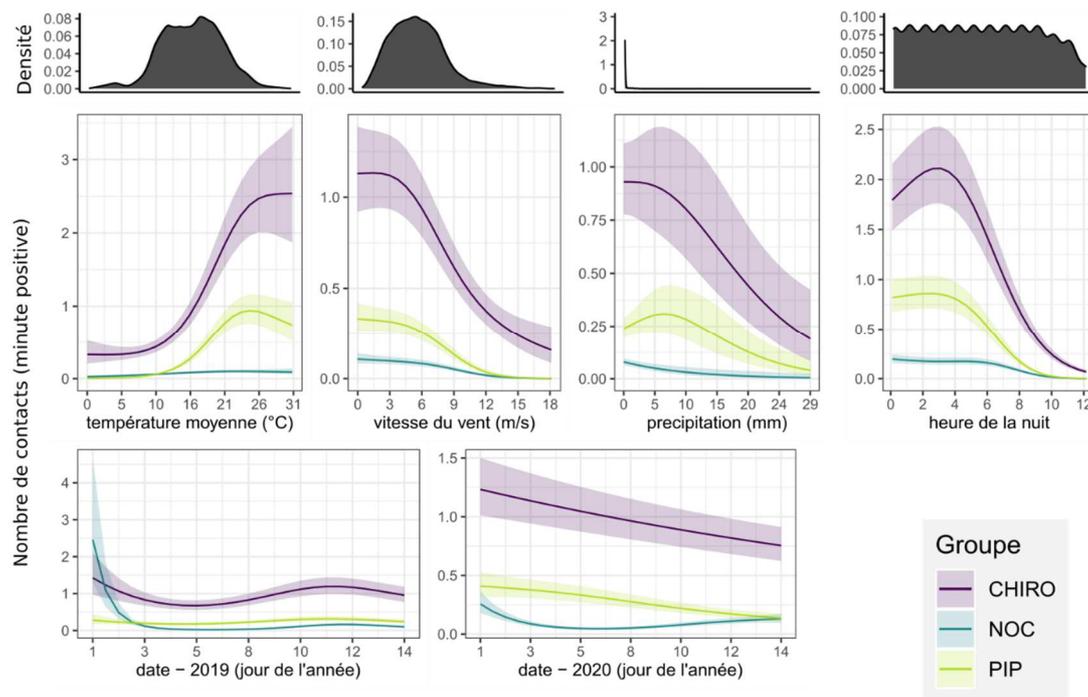
. p < 0,1

ns non significatif

3.2.4.2. Résolution temporelle de 1h

Les modèles réalisés à une résolution horaire pour expliquer l'activité au sol présentent une variance expliquée de 26% pour le groupe CHIRO, de 29% pour le groupe PIP et de seulement 5% pour le groupe NOC. Pour l'activité en nacelle, la variance expliquée est de 1% à 4% selon les groupes (Tableau 21). Pour l'ensemble des espèces, que ce soit à la base ou en altitude, l'heure de la nuit est la variable qui explique le mieux les variations d'activité. Les courbes de réponses Figure 8 montrent un pic d'activité au sol deux à trois heures après le coucher du soleil pour le groupe CHIRO puis le nombre de contact prédit chute de moitié en milieu de nuit. Globalement l'activité au sol est plus importante la première moitié de la nuit mais cette différence est moins marquée pour le groupe NOC. En nacelle, cependant, les pics d'activité sont atteints entre deux heures et six heures après le coucher du soleil selon les groupes considérés. De plus, les graphiques de densité montrent que les nuits les plus courtes au début du suivi ont une durée de 9h (incluant les 30min avant le coucher du soleil et les 30 min après le lever du jour). Concernant les autres variables, leur importance pour expliquer l'activité est semblable aux modèles précédents réalisés à une résolution temporelle plus grossière (nuit). L'importance de la température est cependant encore plus marquée pour le groupe PIP.

(1) BASE



(2) NACELLE

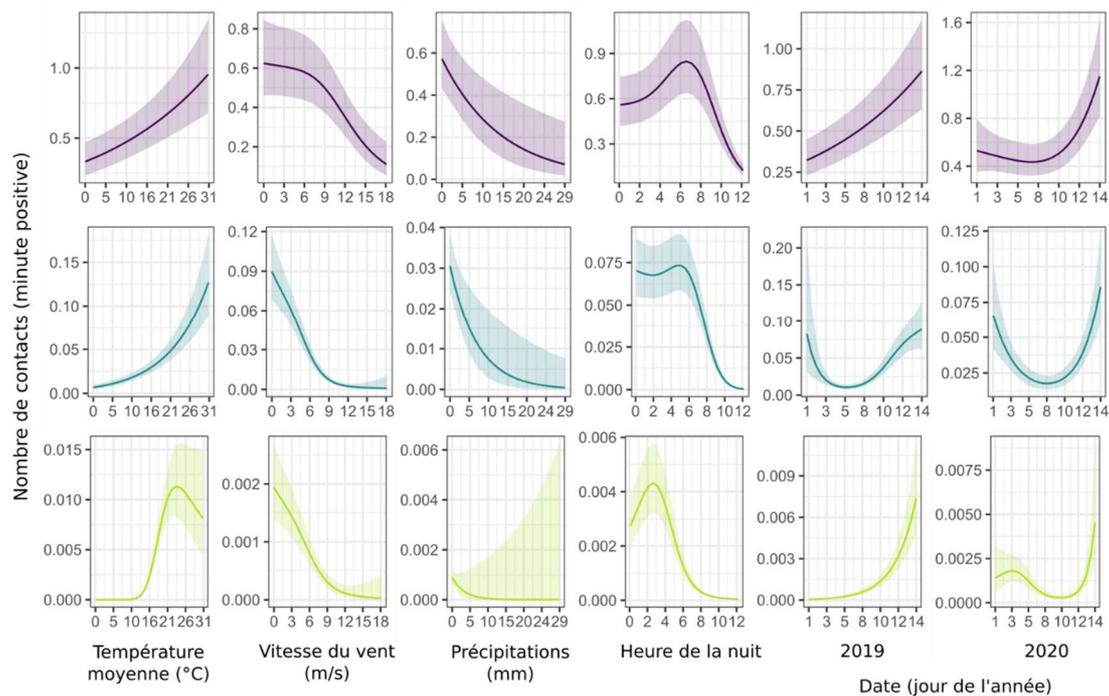


Figure 95. Effets des variables climatiques et de la date sur l'activité chiroptérologique mesurée à la base des éoliennes et en nacelle (résolution « heure »). Résultat des modèle GAMM.

Tableau 21 Résultats des différents modèles additifs généralisés à effets mixtes les plus parcimonieux réalisés pour expliquer l'activité horaire à la base et au niveau de la nacelle avec différentes variables météorologique et temporelles. CHIRO : pour l'ensemble des espèces ; PIP : Pipistrelles sp. ; NOC : nyctaloïdes. $R^2 = \text{pseudo-}R^2$; F = statistique F (test de calibration) ; p = valeur de p ; En gras les modèles qui présentent des résultats significatifs. Résolution des variables : heure

Position	Variable de réponse	Variables explicatives	edf	chi ²	p		
BASE	Activité CHIRO (minutes positives) ^a <i>Pseudo-R²= 0,26</i>	Température	3,0	1108,1	0,000	***	
		Vitesse du vent	2,8	262,9	0,000	***	
		Heure de la nuit	3,0	2271,6	0,000	***	
		Date :	2019	2,9	87,4	0,000	***
			2020	1,0	41,0	0,000	***
		Précipitation	1,9	19,0	0,002	**	
	Activité PIP (minutes positives) ^a <i>Pseudo-R²= 0,29</i>	Température	2,9	1579,4	0,000	***	
		Vitesse du vent	2,8	246,4	0,000	***	
		Heure de la nuit	3,0	1896,3	0,000	***	
		Date :	2019	2,9	67,9	0,000	***
			2020	2,0	150,5	0,000	***
		Précipitation	2,2	20,7	0,000	***	
	Activité NOC (minutes positives) ^a <i>Pseudo-R²= 0,05</i>	Température	2,4	48,9	0,000	***	
		Vitesse du vent	2,8	95,2	0,000	***	
		Heure de la nuit	3,0	776,7	0,000	***	
Date :		2019	3,0	274,1	0,000	***	
		2020	2,9	108,5	0,000	***	
	Précipitation	1,0	11,6	0,000	***		
NACELLE	Activité CHIRO (minutes positives) ^a <i>Pseudo-R²= 0,02</i>	Température	1,0	26,0	0,000	***	
		Vitesse du vent	2,7	30,96	0,000	***	
		Heure de la nuit	3,0	716,2	0,000	***	
		Date :	2019	1,0	38,1	0,000	***
			2020	2,6	52,8	0,000	***
		Précipitation	1,0	9,6	0,002	**	
	Activité PIP (minutes positives) ^a <i>Pseudo-R²= 0,01</i>	Température	2,9	459,5	0,000	***	
		Vitesse du vent	2,2	178,9	0,000	***	
		Heure de la nuit	3,0	1502,9	0,000	***	
		Date :	2019	1,0	128,1	0,000	***
			2020	2,9	52,4	0,000	***
		Précipitation	1,0	2,6	0,109	ns	
	Activité NOC (minutes positives) ^a <i>Pseudo-R²= 0,04</i>	Température	1,0	93,6	0,000	***	
		Vitesse du vent	2,7	474,6	0,000	***	
		Heure de la nuit	3,0	777,0	0,000	***	
Date :		2019	2,9	162,3	0,000	***	
		2020	2,8	74,1	0,000	***	
	Précipitation	1,0	8,5	0,004	**		

^a GAMMS avec une distribution Négative binomiale
edf degrés de liberté effectif
chi² valeur de Chi² pour chaque terme lisse
*** p < 0,001
** p < 0,05
ns non significatif

A retenir de cette partie

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.

3.3. Discussion (volet 2)

3.3.1. Mortalités observées

Les mortalités observées au sein du parc (N=33) comptent 64% de Pipistrelle commune, 18% de Pipistrelle de Kuhl, 9% de Noctule de Leisler, 6% de Pipistrelles sp. et 3% de Pipistrelle de Nathusius. Ces espèces, avec la Noctule commune, font partie des espèces les plus communément contactées en altitude à proximité des éoliennes en Europe du nord et sont particulièrement sensibles au développement éolien (Arnett et al. 2016, UNEP/EUROBATS 2019). De plus, selon Arnett et al. (2016), 90% des cadavres retrouvés au pied des éoliennes européennes appartiennent au genre Pipistrellus, Hypsugo ou Nyctalus. Certaines de ces espèces sont des espèces arboricoles et migratrices capables de parcourir plusieurs centaines de kilomètres entre leurs gîtes d'été et leurs gîtes d'hiver (ex. la Pipistrelle de Nathusius et la Noctule de Leisler) alors que les autres sont des espèces résidentes plus généralistes (ex. Pipistrelle commune et Pipistrelle de Kuhl). De ce fait, les mortalités observées au sein du parc concernent des espèces qui peuvent avoir des interactions comportementales différentes avec les éoliennes suivant les périodes du cycle biologique considérées et des impacts associés à différents processus écologiques (par exemple, une plus grande vulnérabilité des espèces migratrices du fait notamment d'impacts cumulés sur les trajectoires migratoires).

24% des mortalités ont été rapportées pour des vitesses de vent moyennes supérieures à 6 m/s pendant la nuit précédant la découverte du cadavre, dont une Noctule de Leisler (cadavre frais) après un vent moyen de $11,1 \pm 1,54$ m/s. Ces chiffres sont légèrement supérieurs aux résultats énoncés dans la littérature scientifique mais restent tout de même cohérents. Arnett et al. 2008 estiment ainsi que **82 à 85% des mortalités avaient lieu les nuits avec des vents médians inférieurs à 6 m/s**. En Europe et aux Etats-Unis, d'autres études ont défini des **taux maximums de mortalité, toutes espèces confondues, entre 3,5 et 6,0 m/s** (Amorim et al. 2012; Korner-nievergelt et al. 2013; Arnett et al. 2016).

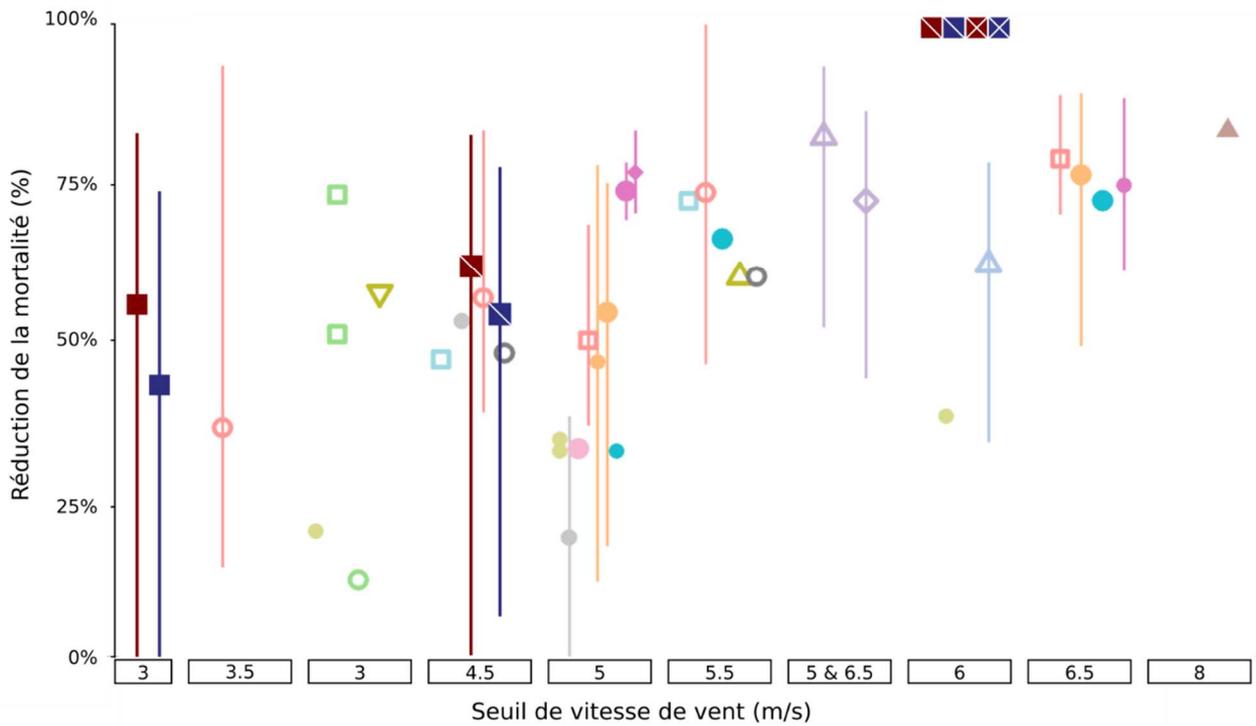
3.3.2. Effets des modalités de régulation sur la mortalité

Considérant l'ensemble des espèces, le nombre de cadavres estimés diminue par rapport aux éoliennes témoin de 56% (95% IC : -17%–83%) lorsque les éoliennes sont mises en drapeau sous un vent de 3 m/s (modalité 2) ; de 61% (95% IC : -6%–83% ; $p < 0,1$) lorsque les éoliennes sont mises en drapeau sous un vent de 4,5 m/s et lorsque les températures sont supérieures à 10°C ; de -100% (95% IC : non calculable) lorsque les éoliennes sont mises en drapeau sous un vent de 6 m/s et lorsque les températures sont supérieures à 10°C (modalité 4) ou 15°C (modalité 5) situations dans lesquelles aucun cadavre n'a été découvert.

De même, la probabilité de découvrir au moins un cadavre est réduite de 43% (95% IC : -17%–74%) et de 54% (95% IC : 6%–77%) avec les modalités 2 et 3 respectivement. Les résultats observés concernant la modalité de régulation la moins stricte (vent < 3 m/s) présentent une réduction de la mortalité plus élevée que les résultats mentionnés dans la littérature.

En effet, une méta-analyse récente réalisée par Whitby et al. (2021) aux Etats-Unis fait état d'une **réduction de 33% de mortalité à chaque fois que l'on augmente de seuil de déclenchement des éoliennes de 1 m/s** (seuil de vent uniquement). Il souligne cependant la présence d'une **importante variabilité d'efficacité mesurée des bridages associés à des seuils de vent inférieurs à 5m/s** suivant les parcs étudiés (variabilité spatiale et temporelle) (Figure 96). Cette méta-analyse se base sur près de 19 études de régulation mis en place au sein de huit parcs éoliens américains entre 2007 et 2017 avec des valeurs seuils testées variant de 3,5 à 8 m/s de vent sur plusieurs espèces de chiroptères impactées par le développement éolien. Pour l'ensemble des espèces, le **pourcentage moyen de réduction des mortalités calculé est de 31% (95% IC : 4%–50%) pour un seuil de 3,5 m/s** (seuil légèrement plus élevé que la modalité 2 de cette étude) ; **54% (95% IC : 43%–63%) pour un seuil de 4,5 m/s** (équivalent à la modalité 3 mais sans seuil de température) et **75% (95% IC : 68%–80%) pour un seuil de 6 m/s** (équivalent à la modalité 4 et 5 mais sans seuil de température).

En Europe, Behr et von Helversen (2006) ont estimé une **baisse de mortalité de 50% pour une régulation des éoliennes sous 4,0 m/s**. Martin et al. (2017) est l'une des rares études américaines à tester l'efficacité d'une modalité de régulation couplant un seuil de vent (<6m/s) et un seuil de température (>9,5°C). Cette modalité, proche de la modalité 4 de cette étude, a réduit la mortalité de 62% (95% IC 34%–78%) et a engendré une perte de production d'électricité inférieure à 1% sur l'année.



Résultats obtenus sur le parc d'Arques (2019-2020)

- *En nombre de cadavres estimé*
 - *En probabilité de découvrir au moins un cadavre*
- Seuil de température additionnel : ■ 10°C
 ■ 15°C

Figure 96. Pourcentage de réduction de mortalité observée suivant différents seuils de régulation. Figure issue de la méta-analyse de Whitby et al. 2021 à partir de plusieurs études nord-américaines réalisées entre 2007 et 2017 (seuil de vitesse de vent uniquement) et complétée à partir des résultats obtenus dans cette étude.

La première analyse à large échelle de la situation française réalisée au niveau du Volet 1 du programme OPRECh sur la base de 52 études, présentée au niveau de la Figure 82 page 106 va dans le même sens (réduction de mortalité de -30/45% pour des seuils moyens de 4 à 5 m/s, -50/60% pour des seuils moyens de 5 à 6 m/s, - 80/100% pour des seuils moyens de 6 à 7 m/s).

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

A l'échelle de la nuit, les modèles se basant sur les variables climatiques et temporelles sont plus performants pour expliquer l'activité au sol qu'en nacelle, avec une part de variance expliquée satisfaisante (pseudo- $R^2=0,46$ et $0,47$ respectivement). La part de variance expliquée par les modèles est plus faible pour le groupe NOC, que ce soit à la base (pseudo- $R^2 = 0,15$) ou en altitude (pseudo- $R^2 = 0,20$), soulignant qu'une part importante de variance serait expliquée par d'autres variables ou phénomènes aléatoires non pris en compte dans les modèles.

A une résolution horaire, les modèles présentent une part de variance expliquée beaucoup plus faible, en particulier en nacelle (pseudo- $R^2 < 5\%$). Notons cependant que l'activité au sol est dominée par des espèces du groupe PIP (65% de PIP et 19% de NOC) et que l'activité de nyctaloïdes (espèces de haut vol) est plus marquée en nacelle (50% PIP et 48% de NOC). La faible variance expliquée dans les modèles à des résolutions plus fines (contrairement aux résultats de Hayes et al. 2019 à des résolutions de 10 min) peut être expliquée par une forte augmentation de la variabilité et une proportion de zéro beaucoup plus importante dans les relevés. Ces résultats questionnent également les effets d'échelles associés aux réponses temporelles de l'activité en fonction des variations climatiques intra-nuit. Globalement, les effets mis en évidence restent cependant cohérents quelques soient les échelles et résolutions considérées. Nous discuterons donc ici les résultats obtenus à partir des modèles à une résolution journalière (nuit) auxquels nous ajouterons les informations supplémentaires obtenues à des résolutions plus fines (activité intra-nuit).

Dans la partie 4, 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 sensibilité au vent et l'effet de la temporalité (date) est plus marquée en nacelle qu'au sol pour l'ensemble des groupes d'espèces étudiés.** Ces résultats sont cohérents avec ce qui est connu dans la littérature scientifique et sont très proches des résultats obtenus par Behr et al. (2017) en Allemagne. En effet, les variables climatiques influent sur l'activité des espèces insectivores à différentes échelles temporelles que ce soit de manière directe (physiologie, capacités de déplacement, dépenses énergétiques) ou indirecte (disponibilité en ressources alimentaires) (Pettit and O'Keefe 2017; Appel et al. 2019). Pettit et O'Keefe (2017) ont également montré que le jour de l'année, la température, le vent et les précipitations étaient les variables testées qui expliquaient le mieux la temporalité des migrations et de la formation des colonies chez *Myotis sodalis* aux Etats-Unis. Notons cependant que **les variables météorologiques pourraient avoir une influence différente (sensibilité, importance relative et force des effets, échelles spatiales et temporelles des effets) sur les activités en fonction des processus écologiques impliqués (ex. chasse, déplacements locaux, migrations) et en fonction des périodes considérées (période de mise-bas et élevage des jeunes, swarming).**

Dans cette étude, les variables d'activité intègrent plusieurs types d'activités sans distinction. Elles intègrent des comportements de chasse ou de transit d'adultes et de jeunes individus de l'année, des comportements spécifiques aux périodes de swarming automnale caractérisés par de fortes interactions entre les individus (ex. parades nuptiales, territorialité) et des comportements associés à un début de migration automnale. En Allemagne par exemple, Lehnert et al. (2014) ont analysé près de 136 cadavres de Noctule commune retrouvés sous des éoliennes entre 2002 et 2012 et ont montré que 28% d'entre eux étaient des adultes migrants (essentiellement des femelles) et que les 72% d'individus résidents étaient essentiellement des juvéniles. De plus, ces activités sont probablement caractérisées par un différentiel de détectabilité entre les périodes/comportements avec une émission ultrasonore plus intensive en période de chasse. A contrario, des individus en transit ou en migration peuvent émettre peu d'ultrasons et contribuent ainsi à une part plus faible de l'activité enregistrée. De ce fait, les variables calculées en minutes positives pourraient permettre de réduire les variations d'activité très ponctuelles induites par des comportements de chasse et de mieux représenter les comportements associés aux migrations. La variable P75 correspondant à une forme de « pic d'activité » pourrait, quant à elle, accorder un poids plus important aux activités de chasse et traduire des informations complémentaires.

3.3.3.1. Le vent

La vitesse du vent est considérée comme **l'une des variables les plus importantes, avec la température, pour expliquer l'activité des chiroptères** hors période d'hibernation (Erickson and West 2002; Arnett et al. 2011, 2016), ce qui est **en accord avec les résultats que nous avons obtenus, en particulier en nacelle.** En altitude, nos résultats montrent une **sensibilité plus importante des pipistrelles au vent avec une activité**

très faible prédite au-dessus de 6m/s, similaire aux résultats obtenus par Behr et al. (2017) en Allemagne. En effet, ils ont montré que 6,4 % de l'activité des pipistrelles était enregistrée au-dessus de 5 m/s. Néanmoins, ils ont également mis en évidence une **plus grande tolérance de la Pipistrelle de Nathusius aux vitesses de vent plus élevées** contrairement aux autres espèces de pipistrelles (18% de l'activité de cette espèce enregistrée avec des vitesses de vent supérieures à 5 m/s) pouvant être dû à sa morphologie plus robuste (espèce de plus grande taille). Cependant, si l'on considère l'ensemble des espèces (et notamment les espèces de haut vol telles que les noctules), le nombre de contacts estimés ou la probabilité d'avoir au moins un contact ne sont réduits que de 60 à 70% pour des vitesses de vent supérieures à 6 m/s. En effet, les données d'activités enregistrées sur le parc étudié montrent de **32% (en minutes positives) ou 18% (en nombre de cris) de l'activité a été enregistrée en nacelle lors de vents supérieurs à 6m/s**. Ces résultats s'avèrent supérieurs aux pourcentages d'activité (en nombre de cris) toutes espèces confondues observés en Allemagne par Behr et al. (2017) s'élevant à 15% et 6% au-dessus de 5 m/s et 6 m/s respectivement (avec 70,4% de l'activité totale appartenant au groupe Nyctaloides ; 48% dans notre étude).

Le vent impacte l'activité des chiroptères de différentes manières puisque qu'il conditionne la distribution et le mouvement des ressources alimentaires d'une part (ex. Erickson and West 2002) mais également le coût énergétique des déplacements, facteur particulièrement important en période de migration. Les nuits les plus chaudes et avec un vent faible sont en effet considérées comme les conditions optimales pour l'activité de chasse (Erickson and West 2002; Fukui et al. 2006) et les activités de migration semblent avoir lieu principalement à des vitesses de vent inférieures à 6 m/s (Horn et al. 2008; Arnett et al. 2011). Les influences de la vitesse de vent et sa direction sur l'activité migratoire sont cependant peu documentées dans la littérature scientifique. Chez certaines espèces, les périodes de migration correspondent à des périodes de l'année marquées par des vitesses moyennes de vent plus élevées que le reste de l'année (ex. *Myotis sodalis* aux Etat-Unis, Pettit et O'Keefe (2017) et *Lasiurus cinereus* Cyan et Brown 2007). De plus, l'activité migratoire s'est parfois avérée plus élevée lors de vents avec une direction favorable (ex. Mabee et al. 2005 mais également Dechmann et al. 2017). En effet, un vent fort peut être particulièrement contraignant pour les activités de chasse ou pour les déplacements locaux mais une direction propice aux migrations pourrait être, au contraire, favorable aux déplacements sur de longues distances. Au cours des suivis effectués sur le parc d'Arques, 90% des mortalités observées lors de vent supérieurs à 5m/s la veille étaient associés à des vents chaud (c.a.d. une température supérieure à 17°C) avec une direction dominante Sud-Est. Les analyses plus poussées sur l'effet de la direction du vent du vent n'ont cependant pas permis de mettre en évidence des relations significatives avec les mortalités.

3.3.3.2. La température

La vitesse du vent est la variable la plus utilisée pour définir des mesures de régulation des éoliennes. Or, la température influe également sur l'activité des chiroptères à différentes échelles spatio-temporelles de manière directe (physiologie, coût énergétique) et indirecte (activité des ressources alimentaires) (Rodrigues et al. 2015)(Erickson and West 2002, Arnett et al. 2011, Arnett et al. 2016). Une baisse de température est associée à une baisse d'activité pour de nombreuses espèces que ce soit en zones tropicales ou tempérée (Appel et al. 2018) avec une activité considérée comme très faible en dessous de 10°C (Martin et al. 2017). Ce seuil de 10°C est souvent défini de manière empirique car associé à une faible abondance en ressources alimentaires (ex. Martin et al. 2017, Wolbert et al. 2014, Kusch and Idelberger 2005). Les courbes de réponse obtenues dans notre étude (Figure 91) valident la pertinence de ce seuil de 10°C pour les groupes CHIRO et PIP avec une forte augmentation de l'activité entre 10 et 25°C, très similaire aux résultats obtenus par Behr et al. (2017). Les résultats sont cependant plus ambigus pour le groupe NOC dont l'activité mesurée est peut-être moins dominée par des activités de chasse régis par la présence de ressources alimentaires mais plus par des comportements sociaux et/ou prémigratoires. L'utilisation de seuil de température pour définir des modalités de régulation semblent donc pertinent pour réduire les risques de mortalités associées aux pipistrelles mais plus incertains pour les espèces migratrices telles que les noctules. Néanmoins, au regard de la distribution de la variable température au cours de suivi, il est important de souligner que les nuits en dessous de 10°C ont été assez rares.

3.3.3.3. La pluviométrie

L'effet de la pluviométrie sur l'activité s'avère plus secondaire au sein du parc étudié avec des effets négatifs plus marquées et plus significatifs lorsque les analyses sont effectuées à des résolutions temporelles plus fines (heure) plutôt que rapportées à l'ensemble de la nuit. La pluviométrie a un effet sur

l'activité des chauves-souris en agissant sur l'activité des insectes consommés et plus secondairement sur l'écholocation (propagation du son) et le coût énergétique des déplacements (Voigt et al. 2011 ; Geluso and Geluso 2012 ; Pettit and O'Keefe 2017). Cependant, les **activités de chasse ne sont pas interrompues lors de faibles pluies et les pluies plus intenses peuvent avoir des effets différés** (ex. effet prolongé après le passage d'une tempête ; Appel et al. 2019). En accord avec nos résultats, l'effet de la pluviométrie sur l'activité semble secondaire, à l'exception des événements pluvieux ponctuels intenses (Weinbeer et al. 2006 ; Appel et al. 2019).

Notons cependant que nos résultats sont fragilisés par la résolution spatiale de nos données pluviométriques, relevées à 5 km de la zone d'étude. De plus, seules les pluies survenues pendant la nuit ont été prises en compte. Or, des épisodes pluvieux intenses survenus en journée pourraient également avoir un **effet à retardement sur l'activité nocturne**. Par exemple, Weinbeer et Meyer (2006) ont observé que de fortes pluies en fin de journée pouvaient altérer l'activité sur l'ensemble de la nuit. Par ailleurs, comme pour les variables précédentes, la **pluviométrie n'affecte pas les activités de chasse et de migration de la même manière**. Même si certaines études soulignent une absence ou une réduction de migration lors des épisodes pluvieux (ex. Mcguire et al. 2012 ; Pettit and O'Keefe 2017), certaines espèces nord-américaines comme *Lasiurus cinereus* semblent se déplacer avec les fronts de tempêtes automnales.

Enfin, notons que nous avons ici fait le choix d'inclure une variable de pluviométrie pour des raisons techniques (accès aux données) et parce-que cette variable devait être initialement incluse dans les modalités de régulation mise en place, ce qui n'a finalement pas été le cas. **L'humidité pourrait être une variable intéressante à tester puisqu'elle est liée à la pluviométrie et pourrait mieux intégrer les effets différés des épisodes pluvieux importants (persistance de l'humidité)**.

3.3.3.4. Jour de l'année

Dans notre étude, le **jour de l'année a un effet significatif sur l'activité à la base et en nacelle, avec une forte variabilité au cours des deux années de suivi** (significativité, courbes de réponse et force des effets). **L'importance de cette variable est plus élevée pour le groupe NOC que pour les PIP** (deuxième variable la plus importante pour ce groupe après le vent). Elle explique également une part plus importante de l'activité en nacelle pour l'ensemble des groupes. Cette variable de temporalité **traduit des changements dans le cycle biologique des espèces associés à des variations d'activité et de comportement de vol**. Pour l'ensemble des groupes, l'année 2019 est marquée par un **pic d'activité lors du dernier tiers de la période de suivi probablement associé à un début de phase migratoire. Ce pic est particulièrement marqué en nacelle, probablement associé à une part plus importante d'activité de migration**. En 2020 cependant, ce pic est moins marqué et pourrait être la conséquence d'un départ plus tardif des espèces étudiées. Chez *Miniopterus schreibersii*, espèce présente en Europe, les départs en migration semblent en partie induits par des variations de la température moyenne au cours des saisons (Rodrigues and Palmeirim 2008). Aux Etats-Unis, Pettit et O'Keefe (2017) ont mis en évidence une relation entre le jour de l'année et les départs en migration de *Myotis sodalis* qui semble être d'avantage guidé par des facteurs physiologiques que par l'abondance en ressources alimentaires. Pettit et O'Keefe (2017) ont cependant également souligné **une forte variabilité des dates de départ et d'arrivée entre les années avec une des dates de départs en migration automnales variants du 20 août ou 31 octobre**. Ceci pourrait expliquer la disparité des réponses entre les deux années que nous avons étudiées et, en partie, la faible transférabilité des modèles d'activité ou de mortalité dans le temps et dans l'espace. **Ces résultats soulignent également la nécessité d'effectuer des études sur plusieurs années pour mieux quantifier et mieux prédire cette variabilité interannuelle**. Les résultats des études menées sur une seule année (ex. études d'impacts) doivent donc être interprétés avec précaution.

3.3.3.5. Heure de la nuit

Les modèles intra-nuit (résolution horaire) ont permis de mettre en évidence **une activité plus importante des chiroptères (tous groupes confondus) lors de la première moitié de la nuit, en particulier au sol**. L'heure de la nuit est, de fait, la variable qui explique le mieux les variations d'activité intra-nuit. **En nacelle, l'activité est légèrement prolongée avec des pics d'activité (NOC et CHIRO) plutôt au milieu de la nuit**.

L'activité est globalement plus élevée durant les quatre premières heures de la nuit (débutant 30 minutes avant le coucher du soleil) pour les groupes CHIRO et PIP et pendant les six premières heures pour le groupe NOC.

Pour le groupe NOC, l'activité prédite est élevée dès le crépuscule alors que le groupe CHIRO présente un pic d'activité après la tombée de la nuit. En Allemagne, Behr et al. (2017) ont obtenu des résultats similaires, avec un pic d'activité la première moitié de la nuit et une activité des espèces Nyctaloïdes (majoritairement la Noctule commune) avant le coucher du soleil contrairement aux autres groupes étudiés. Ils ont cependant montré l'existence de patrons d'activité différents pour la Pipistrelle de Nathusius comparée aux autres espèces qu'ils ont étudiées avec un pic d'activité plus marqué en milieu de nuit. **Quelle que soit l'espèce considérée, le début de nuit est dominé par des activités de chasse** (augmentation de la fréquence de buzz, voir par exemple Kusch and Idelberger 2005), de transit (gîte – terrain de chasse) et des interactions sociales. Un suivi télémétrique automnale de Noctule commune en Suisse a notamment souligné une activité de chasse marquée en début de nuit à proximité des gîtes pour l'ensemble des individus équipés, suivi d'une phase de déplacements sur des distances et des durées très variables selon les individus (45–117 km pour des vols de 1,7 à 4,1 heures par nuit) (Teague O'Mara et al. 2019).

3.3.3.6. La vitesse du rotor

Dans cette étude, nous avons noté un **effet significatif négatif de la vitesse du rotor sur les mortalités, indépendamment des effets associés à la vitesse du vent**. Cette variable n'a pas été intégrée aux études d'activité du fait d'une corrélation élevée entre vitesse du rotor et vitesse du vent ce qui ne permet pas d'inclure ces deux variables dans un même modèle. Cependant, il est **probable que la vitesse des pales influent l'activité de manière additionnel à la vitesse du vent**. Cryan et al. (2014) a analysé le comportement des chauves-souris à proximité des éoliennes à partir d'analyses d'imagerie infrarouge sur trois éoliennes en Indiana aux Etats-Unis entre le 29 juillet et le 1er octobre 2012. Ils ont notamment démontré que l'activité en nacelle dans la zone abritée du vent augmentait significativement avec la vitesse de vent si les pales étaient à l'arrêt mais diminuait si les pales étaient actionnées. De plus, les chauves-souris sont particulièrement sensibles aux mouvements d'air. Aux Etats-Unis, par exemple, une espèce de haut vol *Tadarida brasiliensis* semblerait s'orienter et naviguer grâce au flux d'air (conditionnant les nuées d'insectes), notamment pour s'alimenter en altitude (McCraken et al. 2008 dans Cryan et al. 2014). De ce fait, les turbulences artificielles causées par la rotation des pales sont probablement détectées par les chauves-souris entraînant des comportements d'évitement plus prononcés à des vitesses de rotation élevées (Cryan et al. 2014). L'effarouchement des chiroptères lorsque la vitesse de rotation des pales est élevée pourrait donc avoir un effet négatif additionnel aux effets liés à la vitesse du vent sur l'activité et sur la mortalité. L'effet significatif de cette variable sur la mortalité (contrairement à la vitesse du vent seul) résulte donc probablement d'un effet combiné sur l'activité associé au fonctionnement du rotor (effarouchement) et à la vitesse du vent.

A retenir de cette partie

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 (ex. parades nuptiales). Ces différents types d'activité (ex. comportements sociaux, chasse et migration) ne sont pas distingués dans les différentes métriques d'activité utilisées, ne sont pas impactées de la même manière par les variables climatiques et présentent une variation saisonnière importante.

3.3.4. Un lien partiel mais significatif entre mortalité et activités

Dans la partie 2, une **variable d'activité en nacelle présente une corrélation significative avec la mortalité, à savoir le nombre d'heures au cours de la nuit présentant une activité (en durée cumulée) plus élevée que le troisième quartile** (soit supérieure à 9 et 13 secondes d'activité cumulée par heure pour CHIRO et PIP respectivement). Trois variables d'activité à la base de l'éolienne ont également un effet significatif sur la mortalité pour les deux groupes étudiés à savoir (1) le nombre d'heures au cours de la nuit présentant une activité (en durée cumulée) plus élevée que le troisième quartile (soit supérieure à 15 et 16 secondes d'activité cumulée par heure pour CHIRO et PIP respectivement) ; (2) le nombre d'heures au cours de la nuit présentant une activité (en durée cumulée) plus élevée que la moyenne (soit supérieure à 18 et 20 secondes d'activité cumulée par heure pour CHIRO et PIP respectivement) et (3) le nombre de minutes positives d'activité à la

base de l'éolienne au cours de la nuit. L'activité mesurée à la base et en nacelle permet donc de prédire une partie des mortalités mais ces résultats sont sensibles à la métrique d'activité utilisée.

L'absence de relation entre la mortalité et les autres variables d'activité peut s'expliquer par une plus forte variabilité spatio-temporelle capturée par ces variables (ex. nombre de cris, temps cumulé d'activité). De plus, les modèles élaborés pour expliquer les mortalités à partir de différentes métriques d'activité montrent une faible proportion de variance expliquée au sol ou au niveau de la nacelle (pseudo- $R^2 < 2\%$). **Ceci tendrait à souligner que les mesures d'activités ne permettent de prédire que très partiellement l'occurrence de mortalité. Différents facteurs d'origine méthodologique ou écologique peuvent expliquer ce résultat : (1) une imprécision temporelle des données de mortalité persistante malgré leur correction (incertitude sur la date de mortalité), (2) une détection partielle et hétérogène des différents types d'activité (ex. migration, chasse, etc.) et (3) un différentiel de risque suivant les activités, le comportement et la phénologie des individus (ex. comportement de swarming, jeunes individus inexpérimentés, activité de migration).** De plus, le taux de persistance des cadavres est faible (certains cadavres disparaissent avant d'être découvert) limitant ainsi le nombre de cadavre observé et augmentant les « fausses absences » de cadavres, source de bruit statistique.

Le lien entre activité et mortalité est hétérogène (positif ou sans effet) dans la littérature alimentant un débat quant à la prise en compte de l'activité dans les mesures de régulation. Korner-Nievergelt et al. (2013) ont par exemple montré qu'il était possible de prédire correctement le taux de mortalité à partir de données d'activité en nacelle mesurées à partir de Batcorders. En effet, une activité mesurée en nacelle témoigne de la présence d'un individu dans la zone de rotation du rotor qui est une zone à risque plus élevée. En partant de ce postulat, de nombreuses études ont montré l'efficacité des mesures de régulation basées sur des variables connues pour affecter l'activité telles que la période de l'année, le vent et la température (ex. Martin et al. 2017, Withby et al. 2021, Arnett et al. 2013) mais également en régulant les éoliennes la première moitié de la nuit (Young et al. 2011). Néanmoins, d'autres publications soulignent l'absence de corrélation entre activité mesurée en nacelle et mortalité notamment à cause des biais de détection et argumentent sur la nécessité d'intégrer d'autres paramètres pour la définition des mesures de régulation (ex. localisation des gîtes arboricoles à proximité ; voir Solick et al. 2020 ; Voigt et al. 2021). **Or, nos résultats ont permis de montrer qu'il existait bien une corrélation entre activité en nacelle et mortalité, ainsi qu'une corrélation entre activité à la base de l'éolienne et mortalité malgré une forte variabilité non-expliquée. Une forte activité à la base de l'éolienne pourrait-être associée à une augmentation des individus s'élevant dans la zone de rotation du rotor, sans pour autant être détectés en nacelle** (ex. présence d'insectes le long du mât ou comportement de parade en période de reproduction). Nous n'avons cependant pas trouvé d'élément dans la littérature scientifique pour affirmer cette hypothèse, nécessitant des investigations supplémentaires.

Pour finir, le lien entre mortalité et activité pourrait être difficile à établir précisément du fait de l'hétérogénéité des formes d'activité considérées et regroupées au sein d'une même métrique. Qualifier l'activité de manière plus fine constituerait une perspective intéressante pour améliorer les capacités prédictives des modèles utilisés (prise en compte différenciées des buzz et des cris sociaux ; utilisation de technique de détection complémentaires). Or, il est actuellement difficile à partir des données acoustiques de qualifier précisément les activités relatives aux comportements sociaux (ex. parade nuptiale) et aux déplacements (transit et migration). En effet, même si certains sons peuvent être utilisés pour qualifier l'activité, certains comportements peuvent induire une baisse des émissions acoustiques (ex. moins d'émission d'individus en migration et lors d'interactions sociales). Dans un commentaire publié en 2007, Paul M. Cyan souligne une relation potentielle entre mortalité et comportement induit par la période d'accouplement automnal des espèces arboricoles aux Etats-Unis tels que les parades nuptiales, la défense de gîtes potentiels et de partenaires. Ces comportements seraient notamment concentrés autour des arbres les plus hauts dans un paysage ce qui justifierait une activité nuptiale plus importante autour des éoliennes utilisées comme "support" pour les parades ou "confondues" avec des arbres de grandes tailles devenant ainsi un point de rendez-vous privilégiés lors des périodes de swarming (Kalcounis-rüppell et al. 2005 ; Cryan 2008; Cryan et al. 2014). De plus, une mortalité plus importante de mâles a été rapportée dans la littérature pendant cette période par Cryan (2007) probablement en lien avec des comportements plus à risque (parades nuptiales, agressivité plus élevée envers d'autres mâles, etc.). **Ces comportements très spécifiques aux espèces arboricoles (ex. les noctules européennes) expliqueraient la sensibilité accrue de ces espèces aux collisions pendant ces périodes (Eurobats 2005; Cryan 2008).**

A retenir de cette partie

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.

3.3.5. Prédire la mortalité en modélisant l'activité : vers l'utilisation d'algorithmes plus complexes ?

Comme nous avons pu le voir précédemment, **mettre en place des mesures de régulation des éoliennes en temps réel à partir de données d'activité uniquement ne semble actuellement pas suffisant, notamment à cause de limites associées à la détectabilité et à la caractérisation de l'activité**. Cependant, **utiliser des modèles prédisant l'activité (ou les activités) à partir de différentes variables connues pour influencer l'activité semble être l'approche actuellement la plus efficace et la moins coûteuse** (Korner-Nievergelt et al. 2013 ; Behr et al. 2017).

Dans notre étude, les **modèles utilisés s'avèrent utiles pour prédire l'activité de manière assez fiable pour le groupe des Pipistrellus sp. Et plus partiellement pour le groupe Nyctalus sp. Ces résultats pourraient permettre d'affiner la définition des seuils de régulation en fonction du temps**. Voigt et al. (2015) et Voigt et al. (2016) soulignent cependant des difficultés quant à la généralisation et la transférabilité des modèles d'une région à l'autre. De plus, une intégration de données acoustiques en temps réel pourrait permettre une plus grande flexibilité des modèles aux événements moins prévisibles (ex. certains pics d'activité) et/ou d'optimiser en temps réel les modèles de régulation prédictives (Heitz et Jung 2017). Ceci pourrait être une approche complémentaire aux modèles prédictifs et efficace pour certaines espèces comme les noctules pour détecter des comportements ponctuels induisant localement des pics d'activité plus difficilement prédictibles (ex. parades en période d'accouplement). Néanmoins, une éolienne nécessite plusieurs dizaines de secondes pour s'arrêter. Cette méthode ne permet donc pas d'arrêter une éolienne avant le passage d'individus en migration et d'éviter ainsi un impact potentiel par collision.

3.3.6. Limites scientifiques et méthodologiques de cette étude

3.3.6.1. Données de mortalité

Tout d'abord, les analyses relatives à la mortalité ont pâti d'un faible nombre de cadavres découverts et d'une imprécision relative à la date estimée de mortalité. Les analyses menées n'ont pu être rapportées qu'à des échelles taxonomiques plus grossière (ex. groupe CHIRO – PIP) gommant ainsi les variabilités interspécifiques, notamment quant à leur sensibilité au développement éolien (ex. groupe NOC et Pipistrelle de Nathusius). Les biais associés à la détection et à la persistance des cadavres sont largement documentés dans la littérature scientifique (Erickson et al. 2004, Huso 2010, Bernardino et al. 2013). Un cadavre n'est pas toujours détecté le lendemain de la mortalité et sa persistance sur site est généralement très faible (prédation). Améliorer la détection des cadavres permettrait d'augmenter la puissance statistique de nos résultats. Pour cela, de plus en plus d'études préconisent l'utilisation de chiens de détection (Barrientos et al. 2018 ; Domínguez del Valle et al. 2020 ; Smallwood et al. 2020). En effet, les chiens sont plus efficaces, plus rapides et améliorent fortement la détectabilité des carcasses de petite taille (Barrientos et al. 2018). D'après Barrientos et al. 2019, ils possèdent un taux moyen de détection des cadavres de petite taille d'environ 87% (IC 69-100). Cependant, même si les chiens de détection sont de plus en plus utilisés en biologie de la conservation, ils sont encore peu nombreux en France et le coût est élevé. De plus, ces méthodes sont plus difficilement standardisables que les protocoles classiques avec des observateurs humains pour des suivis à plus large échelle (race de chien utilisée, méthode d'éducation et d'entraînement, conduite sur le terrain, etc.). Enfin, pour affiner la résolution temporelle intra-nuit et tenter de relier mortalité avec des données comportementales, différentes méthodes complémentaires sont en cours de développement tels que les caméras thermiques et la détection laser ou radar permettant notamment de détecter une chute de cadavre (Cryan et al. 2014; Willmott et al. 2015; Gorresen et al. 2017 ; Système B-Finder©).

3.3.6.2. Données acoustiques et détectabilité

Concernant les données acoustiques, il existe de nombreuses limites méthodologiques quant à la détectabilité des espèces en nacelles conduisant à une forte sous-évaluation de l'activité. Voigt et al. (2021) ont notamment montré que des détecteurs d'ultrasons standard ne couvraient que 23% de la zone à risque pour les chiroptères à basse fréquence d'émission ultrasonore (~20kHz ; cas des Nyctaloïdes) et seulement 4% pour les espèces aux fréquences d'émission autour de 40 kHz (ex. Pipistrelles), pour des éoliennes avec des longueurs de pales de 60 m (pour 35 m pour les éoliennes étudiées dans cette étude). Bach et al. (2020) ont installé des détecteurs dans le mas de l'éolienne (10-15 m au-dessus de la hauteur de bout de pales) en complément des détecteurs en nacelle. Ils ont enregistré à ce niveau plus de sept fois plus d'activité de Pipistrelle de Nathusius que le micro en nacelle, même pour des vents supérieurs à 8 m/s. D'autres études comparant les méthodes de détections acoustiques avec d'autres méthodes complémentaires (ex. caméra thermiques) ont également montré que seulement 30 à 50% des passages de chiroptères étaient détectés par les méthodes acoustiques (Cryan et al. 2014, Gorresen et al. 2017). Cela pourrait expliquer notamment l'absence de contact avéré en nacelle la nuit précédant les mortalités que nous avons observées pour 25% des Noctule de Leisler et 43% des Pipistrellus sp. Cette sous-estimation de l'activité n'est pas homogène entre les espèces (ex. différents traits fonctionnels, hauteur de vol, fréquence d'émission), selon les types de comportements intra-spécifiques (comportement de chasse, de migration et/ou d'interactions entre les individus suivant les périodes du cycle biologique) mais également selon les conditions météorologiques (portée des ultrasons, bruits parasites en nacelle dû à la rotation des pales). Par exemple, la diffusion des ultrasons dans l'air est plus faible pour des fréquences élevées (augmentation de l'atténuation atmosphérique) et dépend de manière non-linéaire de la température et de l'humidité relative (Goerlitz 2018; Voigt et al. 2021). Des simulations dans des conditions atmosphériques typiques des climats tempérés, ont ainsi permis de définir une distance de détection médiane de 40m pour une Noctule commune et de 17 m pour une Pipistrelle de Kuhl ou de Nathusius avec une variation induite par les conditions météorologiques (Voigt et al. 2021 ; paramétrage : seuil de 60 Db SPL re 20 µPA). Cette distance de détection varie cependant suivant le matériel employé (Adams et al. 2012) mais les biais ici présentés peuvent être généralisés quel que soit le matériel de détection utilisé (Voigt et al. 2021). Ainsi, il s'avère préférable d'utiliser des variables climatiques pour élaborer des stratégies de régulation plutôt que de se baser sur une régulation en direct à partir de données d'activité trop dépendantes de la position du micro et du matériel utilisé. Ces informations sur l'activité en direct pourraient cependant être utilisées en compléments des algorithmes multicritères proposés par Korner-Nievergelt et al. 2013 et Behr et al. 2018.

3.3.6.3. Des irrégularités dans la régulation des machines

Pour finir, nous avons noté **un certain nombre d'irrégularités dans la mise en place des modalités de bridage** des éoliennes (Annexe 12). Sur l'ensemble du suivi, certaines éoliennes étaient régulées alors qu'elles ne devaient pas l'être (pendant 6% du temps) ; n'étaient pas régulées alors qu'elles devaient l'être (environ 10% du temps) en particulier pour la modalité 4. Il s'agit ici d'une valeur maximale, puisque le temps d'arrêt des éoliennes lorsque les seuils de bridage sont franchis sont inclus. Cependant, une expertise supplémentaire avec le logiciel ProBat inspector (© OekoFor GbR ; <https://oekofofor.shinyapps.io/probat-inspector/>) a permis de confirmer ces irrégularités. Certains seuils n'ont pas été respectés et il semblerait que certaines modalités aient été interverties dans certains rares cas. Ces irrégularités n'ont cependant pas été observées lors deux jours précédents la découverte des cadavres ce qui n'impacte donc pas le nombre de cadavre observés par modalité (à l'exception des rares cadavres potentiellement plus anciens). Ces irrégularités impactent cependant la valeur des intervalles de confiance. Ainsi, ce résultat interroge sur les difficultés techniques associées à la mise en place, et au respect, des bridages et souligne la nécessité de disposer d'outils spécialisés pour vérifier le bon fonctionnement et la bonne mise en place des actions de régulation souhaitées.

3.3.7. Perspectives

Des investigations complémentaires sur l'effet des variables climatiques et temporelles en dissociant différents types d'activité (chasse, migration et comportements sociaux) permettrait l'obtention d'informations essentielles pour l'optimisation des modèles de régulation et pour une meilleure compréhension des mécanismes écologiques et comportements susceptibles d'augmenter les risques de mortalités. Ces investigations nécessitent notamment l'utilisation de méthodes complémentaires aux

relevés acoustiques classiques qui sont en cours de développement (ex. trajectographie, caméra thermiques, suivis GPS, recherches et suivi des gîtes arboricoles présents à proximité ; ex. Willmott et al. 2015).

Au regard de la forte variabilité des activités pouvant être associées à des pics d'activité aléatoires peu prédictifs, certains auteurs soulignent la nécessité de développer des techniques d'effarouchement telles que des signaux électromagnétiques ou acoustiques pour réduire l'activité des chiroptères à proximité des éoliennes (Nicholls and Racey 2007, 2009 ; Arnett and Baerwald 2013 ; Gorresen et al. 2015).

De plus, des études récentes ont mis en évidence une **fréquentation importante des insectes dans la zone à risques au niveau des turbines (Jansson et al. 2020) associé à des phénomènes d'attraction plus complexes des insectes et donc de leur prédateurs** (Long et al. 2011). Des phénomènes de regroupement d'insectes particulièrement importants ont également été observés, en été et en automne, avec une présence accrue d'insectes migrants et/ou d'insectes profitant de la réverbération de chaleur sur la structure de l'éolienne au crépuscule (Voigt 2021, Rydell et al. 2010). Selon Trieb et al. (2018) et Voigt (2021), 1 200 tonnes soit environ 1,2 trillion d'insectes seraient tués chaque année entre avril et octobre par les éoliennes en Allemagne. **Ainsi, cette abondance d'insectes dans la zone à risque est très probablement un facteur particulièrement attractif pour les chiroptères** (Foo et al. 2017, Roeleke et al. 2016, Valdez et Cryan 2013). Suite à la découverte de mouches diurnes dans les contenus stomacaux de cadavres de chauve-souris trouvés sous des éoliennes, Rydell et al. (2016) en ont déduit que certaines espèces chassaient également des mouches au repos posées sur le mât. Des investigations plus approfondies sur ces interactions proies/éoliennes permettrait d'affiner l'évaluation des risques associés aux chiroptères avant et après implantation et d'apporter des éléments pour la conception de mesures d'évitement et/ou d'effarouchement complémentaires.

3.3.8. Synthèse et conclusion (volet 2)

Au sein du parc étudié, **la régulation définit par des seuils de vitesse de vent et de température inférieurs à 6 m/s et supérieures à 10°C respectivement (modalité 4) s'est avéré être la modalité la plus efficace au regard des données de mortalité et d'activité (groupe PIP principalement)**. Aucun cadavre n'a également été découvert suivant la modalité « vent inférieur à 6 m/s et température supérieure à 15°C » mais cette modalité semble être plus risquée au regard de l'activité prédite du groupe NOC sous ce seuil de température, en accord avec ce qui est connu dans la littérature pour les espèces du genre *Nyctalus*. Or, la dynamique des populations de *Nyctalus sp.* est particulièrement préoccupante au regard du développement éolien. Les analyses de mortalités pour ce groupe n'ont pas pu être réalisées (échantillon trop faible) et les modèles d'activité ont un pouvoir prédictif beaucoup plus faible pour ce groupe que pour le groupe PIP, soulignant une diversité de réponses des groupes étudiés.

Les espèces de chiroptères n'ont pas la même sensibilité au développement éolien et leurs spécificités écologiques soulignent la nécessité d'appréhender les risques et de calibrer les mesures de régulation par groupes biologiques et fonctionnels, voire par espèce. Par ailleurs, les risques de mortalité ne sont également pas homogènes dans le temps, fluctuent en fonction des activités considérées (ex. chasse, migration ou comportement sociaux en période de swarming) mais également très probablement en fonction de l'âge et du sexe (ex. Lehnert et al. 2014) et de la présence ou non de gîtes (notamment arboricoles) à proximité.

Ainsi, **la mise en place d'une régulation est essentielle pour réduire les impacts des éoliennes sur les populations de chiroptères**. Leur calibrage à partir de seuils fixes de vent et de température seulement semble insuffisant dans un objectif d'optimisation, que ce soit pour améliorer la prise en compte du risque associé à la diversité d'espèces sensibles fréquentant le site mais également pour une conciliation des enjeux de biodiversité avec une réduction de la perte de production d'énergie. L'utilisation d'un algorithme multicritère issu des modèles d'activité les plus parcimonieux utilisés dans cette étude pourrait être une approche intéressante. Des méthodes de détection acoustique en temps réel pourraient être testées afin d'affiner la régulation de certaines éoliennes en fonction d'évènements ponctuels moins prévisibles (ex. certains pics d'activité, installation de colonies à proximité, notamment d'espèces arboricoles). Pour cela, une veille acoustique couplée à des prospections de terrain ciblées sur les gîtes arboricoles identifiés à proximité pourrait être mise en place sur le long terme.

Enfin, cette étude souligne l'important effort de prospection nécessaire pour obtenir une puissance statistique satisfaisante, que ce soit pour comparer différentes modalités ou pour mieux comprendre les facteurs expliquant les mortalités. Pour un parc de onze éoliennes, un passage par jour pendant 173 jours durant les trois mois les plus meurtriers et sur deux années suffisent à peine à obtenir une puissance statistique satisfaisante et ne permettent pas de tester des modèles plus complexes pour expliquer et

comprendre l'origine des mortalités. Malgré l'important investissement temporel et financier, l'acquisition de données à plus grande échelle semble nécessaire, notamment pour mieux comprendre les risques associés à des espèces plus rares telles que les noctules. A l'échelle d'un parc, il est nécessaire d'améliorer la détection des cadavres et de réduire les risques liés à leur faible persistance (prédation). Des passages au lever du jour avec des chiens de détection pourraient être une approche efficace mais difficilement standardisable, et un développement technologique et méthodologique ciblé afin d'améliorer la détection des collisions à l'échelle intra-nuit reste nécessaire (détection vidéo, laser ou radar).

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

Les investigations expérimentales du volet 2 du programme OPRECh ont permis de recueillir un jeu de données expérimentales d'une qualité exceptionnelle par rapport aux pratiques d'études classiques sur les parcs éoliens (activité mesurée en continu depuis les nacelles de toutes les éoliennes et depuis les pieds de mâts de chaque éolienne, mortalité recherchée sous toutes les éoliennes tous les jours même les week-end et jours fériés, modalités de régulation randomisées par paires d'éoliennes avec rotation tous les 15 jours, etc.), qui offraient l'opportunité de tester les différents modes 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.). Il s'agissait alors de « mettre en situation ces modes », via des chiroptérologues aguerris à ces approches (qualifications présentées en annexe 14), en leur proposant d'accompagner la réflexion sur une mesure de régulation pour le parc de Arques. La configuration du parc leur a été communiquée. Ils avaient alors la possibilité de retenir une ou deux éoliennes qu'ils auraient retenues pour mettre en place un suivi en hauteur. Les données d'activité ultrasonores de ces éoliennes leur ont été transférées de même que les données climatiques relevés au cours de deux campagnes de suivi 2019 et 2020. Ils devaient alors dérouler leurs habitudes de traitement de données pour aboutir à un conseil. Il s'agissait alors d'analyser quel aurait été l'efficacité du conseil promulgué sur la maîtrise des mortalités.

3.4.1. Simulation du mode de régulation préventif sous seuil de production

L'efficacité attendue du « mode de régulation sous seuil de production » a déjà été analysée dans le volet 2 en considérant que c'est la modalité de régulation n°2 (3 m/s) la plus proche de cette situation pour le parc de Arques, dont les éoliennes ne commencent à produire qu'avec des vitesses de vent supérieures à 2,5 m/s (cf. annexe 2).

Les résultats expérimentaux montrent que ce **mode de régulation aurait théoriquement permis de réduire de -56% le niveau de mortalité théorique du parc non régulé. La mortalité résiduelle brute aurait alors été d'environ 7 pipistrelles**, valeur susceptible d'être proche de la mortalité réelle compte tenu des protocoles de suivis hors normes utilisés sur ce volet expérimental.

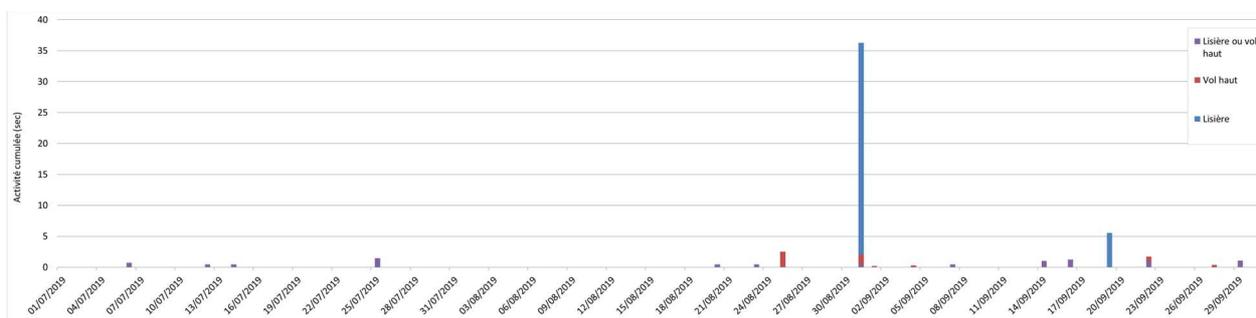
3.4.2. Simulation du mode de régulation préventif conventionnel

L'efficacité attendue du « mode de régulation préventif conventionnel » a déjà été analysée dans le volet 2 avec la modalité de régulation n°4 (6 m/s, 10°C). Les résultats expérimentaux montrent que **ce mode de régulation aurait théoriquement permis de réduire de -100%** le niveau de mortalité théorique du parc non régulé (aucune mortalité brute résiduelle avec ce type de protocole et donc probablement aucune mortalité estimée).

Pour les données expérimentales d'OPRECh, avec le mode de régulation conventionnel à 6 m/s, 10°C, toute la nuit, du 1^{er} mai au 31 octobre, les simulations de l'effet du pattern sur l'activité sont présentées ci-après en seconde d'activité cumulée et en pourcentage.

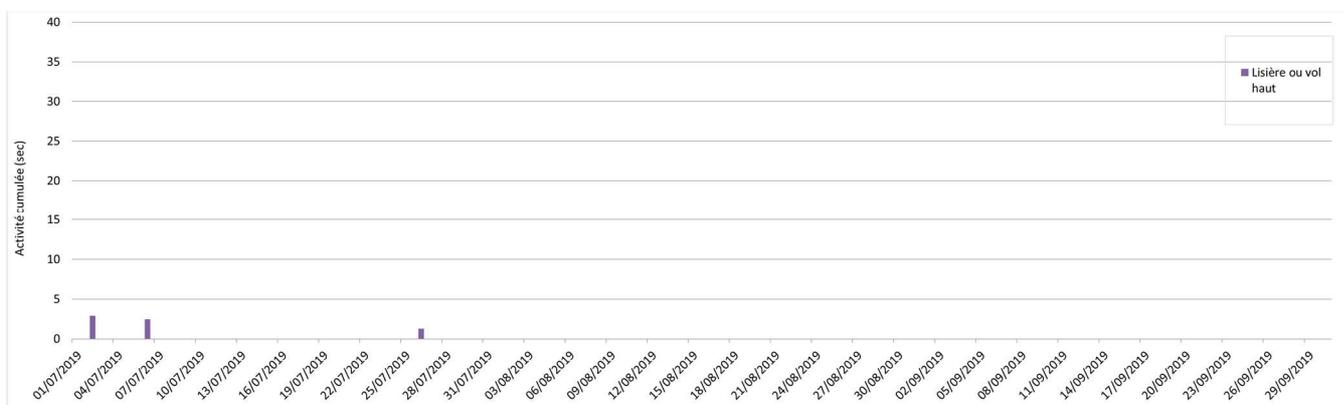
- Pour l'éolienne E4, l'activité mesurée entre juillet et octobre 2019 auraient été très largement couverte (-93%) par la mesure avec seulement 55 secondes d'activité résiduelle à risque, toutes espèces confondues, sur la période de suivi. Cette activité résiduelle aurait surtout concerné une activité ponctuelle de pipistrelles début septembre.

Activité	Groupe de vol				Total général
	Lisière ou vol haut	Vol haut	Lisière	Lisière ou vol haut en migration/transit	
Activité cumulée restante à risque	9,08	5,74	39,79	0,00	54,61
Activité cumulée protégée	145,92	83,79	460,02	14,64	704,37
Total	155,01	89,53	499,81	14,64	758,98
Pourcentage d'activité protégée	94,14	93,59	92,04	100,00	92,80



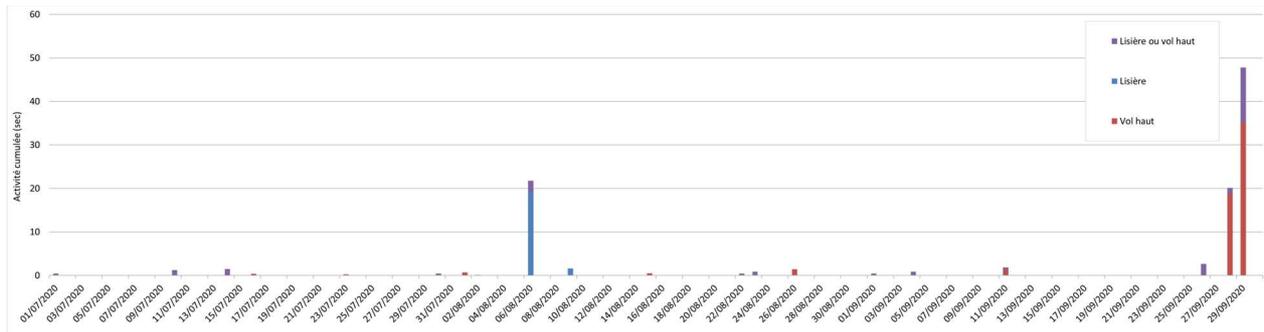
- Pour l'éolienne E9, l'activité mesurée entre juillet et octobre 2019 auraient été encore largement couverte (-95%) par la mesure avec seulement 7 secondes d'activité résiduelle à risque, toutes espèces confondues, sur la période de suivi.

Activité	Groupe de vol			Total général
	Lisière	Lisière ou vol haut	Vol haut	
Activité cumulée protégée	47,74	52,71	24,60	125,05
Activité cumulée restante à risque	0,00	6,66	0,00	6,66
Total	47,74	59,37	24,60	131,71
Pourcentage d'activité protégée	100,00	88,78	100,00	94,94



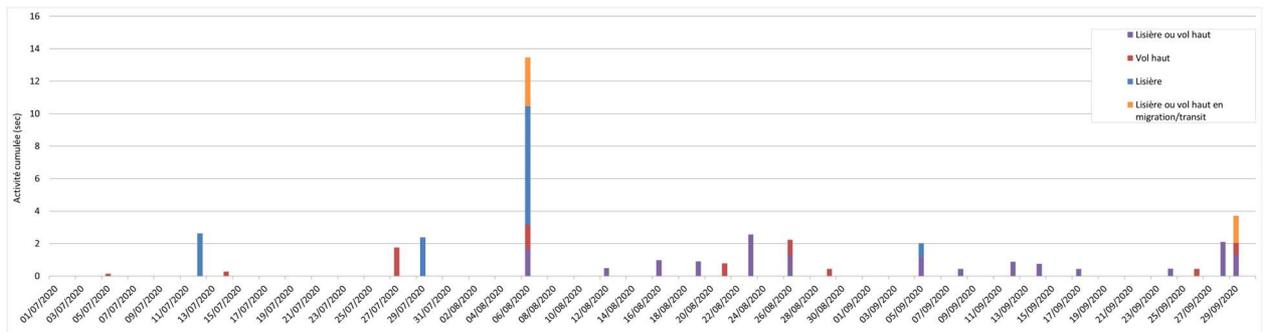
- Pour l'éolienne E4, l'activité mesurée entre juillet et octobre 2020 auraient été encore largement couverte (-95%) par la mesure, mais étant donné que l'activité mesurée est bien plus importante en 2020 qu'en 2019, l'activité résiduelle à risque est supérieure (106 secondes), toutes espèces confondues, sur la période de suivi. L'analyse de la chronologie d'activité non protégée comprend deux passages d'espèces de haut-vol en toute fin de campagne de suivi (60s).

Activité	Groupe de vol						Total général
	Vol bas	Vol haut	Lisière	Lisière ou vol haut	Lisière ou vol haut en migration/transit	Vol haut en migration/transit	
Activité cumulée restante à risque	0,00	58,78	20,70	26,15	0,00	0,00	105,63
Activité cumulée protégée	4,63	198,06	1202,57	215,35	298,67	126,57	2045,86
Total	4,63	256,84	1223,27	241,50	298,67	126,57	2151,48
Pourcentage d'activité protégée	100,00	77,11	98,31	89,17	100,00	100,00	95,09



- Pour l'éolienne E9, l'activité mesurée entre juillet et octobre 2020 auraient été encore largement couverte (-94%) par la mesure, avec une activité résiduelle à risque de 40 secondes, toutes espèces confondues, sur la période de suivi. L'analyse de la chronologie d'activité non protégée montre notamment un pic d'activité interspécifique pris en compte de façon partielle le 6 août.

Activité	Groupe de vol				Total général
	Lisière ou vol haut	Vol haut	Lisière	Lisière ou vol haut en migration/transit	
Activité cumulée restante à risque	15,43	7,00	13,18	4,71	40,31
Activité cumulée protégée	69,22	115,96	428,35	8,80	622,34
Total	84,65	122,96	441,53	13,50	662,65
Pourcentage d'activité protégée	81,78	94,31	97,01	65,15	93,92



Finalement, ces éléments de comparaison entre les simulations d'activité protégée par la mesure et les résultats expérimentaux du volet 2 d'Oprech montrent que :

- La mesure de régulation conventionnelle aurait permis d'éviter l'ensemble des mortalités alors qu'il reste toujours un peu d'activité résiduelle qui n'aurait théoriquement pas été prise en compte par la mesure. **Il ne s'agit donc pas d'exiger de protéger 100% de l'activité pour permettre de maîtriser l'ensemble des risques ;**
- La perception de l'efficacité de la mesure basée sur le pourcentage d'activité pris en compte ou non pris en compte ne permet pas de distinguer des différences de niveau d'activité résiduelle parfois importante pour les mêmes pourcentages. L'approche des pourcentages est donc bien moins fine qu'une réelle analyse du niveau d'activité résiduelle pour orienter la mesure. Selon les années et les éoliennes, les résultats montrent que moins de 80 % de l'activité des espèces de haut-vol (E4, 2020) serait protégée. Or comme aucune mortalité n'a été générée par ces conditions, cela témoigne du fait que **même un pourcentage de 80% de protection de l'activité des espèces de haut-vol peut permettre une maîtrise efficace des mortalités ;**
- **L'apport des chronologies d'activité résiduelle** restant à risque est encore plus pertinent pour représenter le résiduel non protégé et vérifier la cohérence avec les objectifs de la mesure.

3.4.3. Simulation du mode de régulation prédictif basé sur l'outil ProBat (études RENEBAT, source KJM Conseil Environnement)

3.4.3.1. Historique de développement de l'outil ProBat en Allemagne

Dans le contexte du conflit entre le développement des énergies renouvelables via l'exploitation d'éoliennes et la protection des chauves-souris, le logiciel ProBat (www.probat.org) permet d'utiliser un algorithme d'exploitation spécifique à l'installation et favorable aux chauves-souris, qui allie un effet positif pour les chauves-souris et une réduction des pertes de rendement dues à l'arrêt de l'installation.

L'algorithme sur lequel reposent les calculs de ProBat est basé sur les résultats des études des projets de recherche RENEBAT menés entre 2007 et 2016 et a été financé par le ministère fédéral allemand de l'Environnement, de la Protection de la nature et de la Sécurité nucléaire et par le ministère fédéral allemand de l'Économie. Ces projets portaient notamment sur les méthodes d'étude et de réduction du risque de collision des chauves-souris avec les éoliennes terrestres (BRINKMANN et al. 2011, BEHR et al. 2015 et BEHR et al. 2018) et avaient pour objectif de développer des méthodes répondant à la fois aux intérêts de la protection des chauves-souris et à l'objectif de développement de l'énergie éolienne, même sur des sites controversés.

Dans le cadre du projet de recherche RENEBAT I, une validation des méthodes d'étude existantes sur la présence de chauves-souris au niveau des éoliennes a été effectuée. Sur cette base, une méthode a été développée pour quantifier le risque de collision des chauves-souris avec les éoliennes selon des facteurs d'influence temporels, naturels et météorologiques et pour réduire ce risque à l'aide d'algorithmes d'exploitation spécifiques au site. La base de données pour cette méthode est l'activité des chauves-souris enregistrée acoustiquement dans la zone du rotor de l'éolienne correspondante et les vitesses de vent enregistrées au niveau de cette éolienne.

L'objectif de RENEBAT II était de perfectionner les méthodes développées dans RENEBAT I et de tester les algorithmes d'exploitation favorables aux chauves-souris. La vérification de l'algorithme portait sur des points tels que la faisabilité, l'efficacité et les coûts et comprenait également une recherche quotidienne des cadavres sous les éoliennes afin de quantifier l'effet de l'exploitation adaptée aux chauves-souris. En outre, le développement du logiciel ProBat a permis de rendre l'exécution des calculs plus conviviale pour l'utilisateur.

Enfin, le projet RENEBAT III avait pour but de simplifier et standardiser la saisie et la réduction du risque de collision. Pour ce faire, une vérification de la transférabilité des résultats dans le du temps, l'espace et entre installations a été effectuée.

3.4.3.2. Conditions de mise en œuvre de l'outil ProBat

En 2010, l'algorithme développé a également été testé sur un site éolien en France (parc de Castelnaud-Pegayrols,, Aveyron, Behr et al. 2011). Depuis, l'algorithme a été utilisé à de nombreuses reprises en France et a reçu une autorisation d'exploitation de la part des autorités.

La base de données de l'algorithme de calcul est élargie en permanence et adaptée en fonction de l'état de la recherche.

L'algorithme ProBat décrit ici ne doit pas être confondu avec l'outil du même nom de Sense of Life, qui est un système de régulation des éoliennes basé sur une analyse prédictive de l'activité des chiroptères combinée à une détection en temps réel.

ProBat, basé sur les études RENEBAT, associe dans son algorithme de calcul le risque de collision pour les chauves-souris (découvertes de victimes de collision) à l'activité enregistrée à hauteur de nacelle. En utilisant des microphones calibrés, des paramètres d'enregistrement uniformisés et en tenant compte des facteurs spécifiques au site tels que les spécifications des éoliennes (par exemple le diamètre du rotor) et les paramètres environnementaux locaux (par exemple la vitesse du vent à hauteur de nacelle), le calcul d'un algorithme pour les vitesses de démarrage à l'aide du logiciel ProBat permet de comparer différents sites éoliens tout en les traitant de manière égale. Actuellement, les types de détecteurs suivants peuvent être utilisés pour le calcul ultérieur des vitesses de démarrage à l'aide de l'outil ProBat lors de la saisie : le Batcorder de la société ecoObs avec des réglages de seuil de -27 dB, -30 dB et -36 dB, l'Anabat SD1 de la société Titley Electronics ainsi que le BATmode de la société bioacoustictechnology basé sur la technologie d'Avisoft avec

un seuil de 37 dB et les anciens systèmes de la société Avisoft avec un seuil de 50 dB. Des tests sont également en cours avec le Batlogger d'Elekon AG afin de pouvoir l'utiliser prochainement avec ProBat.



Figure 97 Mode de fonctionnement de ProBat. Illustration : Ulrike Eberius

D'autres méthodes pour déterminer le mode de régulation des éoliennes, par exemple la méthode des pourcentages, ne permettent pas de réduire le risque de collision d'une valeur équivalente lorsque l'on compare différents sites. En effet, sur les sites où l'activité des chauves-souris est forte, l'application des critères de pourcentages, qu'ils soient de 80 % ou de 90 %, ne permet pas de considérer que les sites sont traités de manière égale, ni que la réduction du risque d'impact serait suffisante. À l'inverse, avec l'outil ProBat, le risque de collision de chauves-souris peut par exemple être fixé à une valeur moyenne annuelle définie par les autorités, et des vitesses de démarrage globales et optimisées sont alors calculées sur la base de celle-ci.

Outre la définition du seuil de vitesse de vent de régulation des éoliennes global et spécifique au site pour la phase d'activité des chauves-souris correspondante, le logiciel ProBat permet aussi de calculer des seuils optimisés qui sont également spécifiques au site et différenciés selon les mois et les dixièmes de nuit. Ces seuils de vitesses de vent optimisées et différenciées permettent de minimiser les pertes de rendement résultant des réglages des éoliennes.

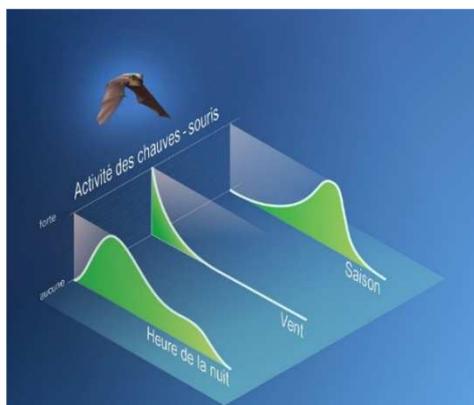


Figure 98 Répartition de l'activité des chauves-souris dans la zone du rotor d'une éolienne (ProBat). Illustration : Ulrike Eberius

3.4.3.3. Test de la méthode RENEBAT avec les données expérimentales d'OPRECh

➤ Vérification des données

Dans le cadre de l'utilisation de l'outil ProBat, le calcul de la vitesse de vent à partir de laquelle les éoliennes seront actives (« vitesse de démarrage ») est précédé d'une vérification approfondie des données. D'une part, les fuseaux horaires dans lesquels les paramètres environnementaux (vent et température à hauteur de nacelle) et les données d'activité sont saisis sont les mêmes. La présence des données dans le même fuseau horaire est essentielle pour le recoupement ou l'attribution des données d'activité aux données de vent

correspondantes. D'autre part, la vérification de cette condition de base est suivie d'une analyse détaillée des données et d'un examen de leur plausibilité.

Selon le guide des données requises pour ProBat, le calcul de vitesses de démarrage est possible si les données relatives au vent et à l'activité sont disponibles pour un nombre de nuits suffisant. Pour cette raison, il est nécessaire de disposer d'une période minimale d'enregistrement acoustique du 15 juin au 15 octobre. La période principale d'activité des chauves-souris en Europe centrale est fixée du 1er juillet au 30 septembre. Depuis la version ProBat 6.0, les mois de mars, avril, mai et novembre ne doivent plus être exclus en cas de faible activité. La « période d'exploitation favorable aux chauves-souris » recommandée est donc du 1er avril au 31 octobre. Pour les deux périodes (« période principale d'activité des chauves-souris » et « période d'exploitation favorable aux chauves-souris »), il existe un pourcentage minimum de nuits pour lesquelles des données devraient être disponibles (75%) ou doivent être disponibles (66%) afin d'effectuer un calcul correct.

La durée de la période nocturne pendant laquelle les chauves-souris peuvent être actives s'étend du coucher au lever de soleil. Dans la mesure où certaines espèces de chauves-souris comme la Noctule commune sont également actives au crépuscule, il est parfois nécessaire de tenir compte de l'intervalle crépusculaire (15% de la durée de la nuit avant le coucher du soleil), tant dans le calcul que dans l'algorithme et afin de pouvoir garantir l'objectif de **ne pas dépasser une mortalité maximale de deux individus par an et par éolienne**. Cet intervalle crépusculaire, défini par ProBat, doit être inclus dans le calcul s'il contient plus de 2% de l'activité totale mesurée.

Pour exploiter les données expérimentales du programme OPRECh, les graphiques de la page suivante montrent la répartition de l'activité acoustique issue des relevés de l'éolienne 9 du parc d'Arques en fonction de la vitesse du vent (Figure 99), des saisons (Figure 100) et des heures de la nuit (Figure 101) sur fond de modèles d'activité enregistrés dans ProBat.

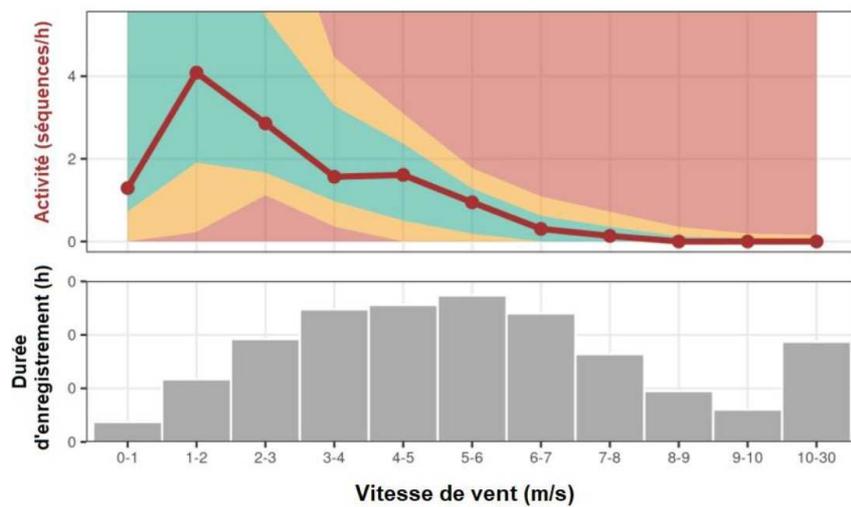


Figure 99 Répartition de l'activité mesurée via OPRECh par rapport à la vitesse de vent au niveau de l'éolienne 9 en 2019

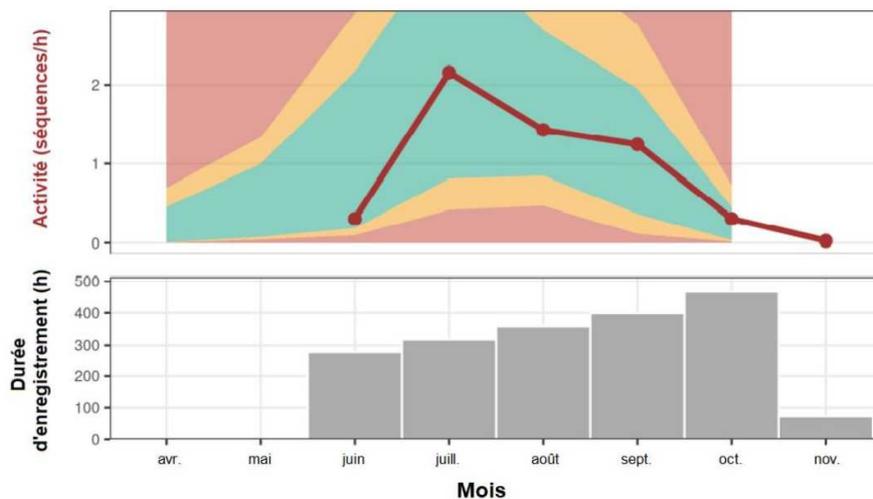


Figure 100 Répartition mensuelle de l'activité mesurée via OPRECh au niveau de l'éolienne 9 en 2020

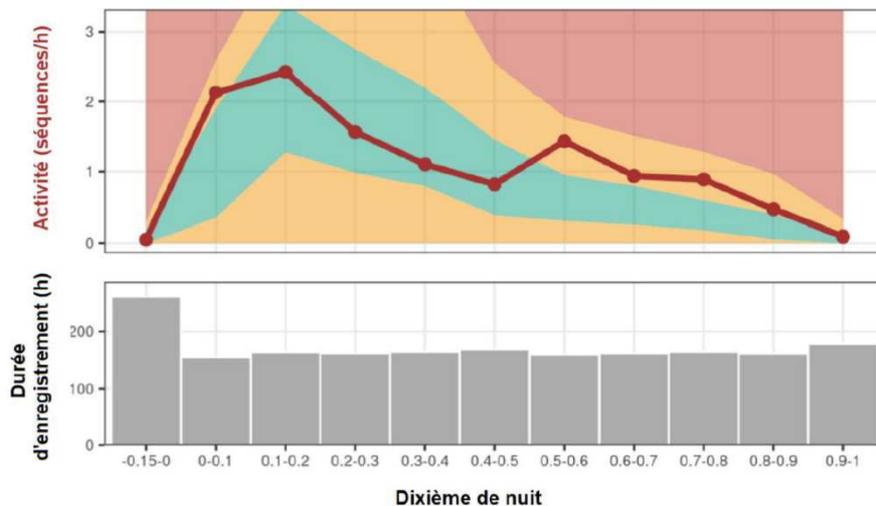


Figure 101 Répartition au cours de la nuit de l'activité mesurée via OPRECh au niveau de l'éolienne 9 en 2020

➤ Résultats du calcul ProBat

Dans le cadre du projet OPRECh, le calcul de vitesses de démarrage adaptées a également été effectué à l'aide de l'outil ProBat pour le site test d'Arques. Pour cela, le jeu de données enregistré sur deux ans avec un Batcorder au niveau de l'éolienne 9 a été utilisé. Dans les études RENEBAT, la valeur par défaut du posttrigger du Batcorder est de 200 ms, ce qui signifie que l'intervalle de temps entre deux ultrasons est de 200 ms au maximum. Ici, comme les données n'ont pas été saisies avec un posttrigger de 200 ms sur le site, un splitting virtuel a été effectué avec le logiciel bcAdmin. Ce splitting simule un Batcorder avec des réglages adaptés pour le seuil et le posttrigger, de sorte que les enregistrements existants sont par exemple évalués en fonction d'un posttrigger plus court.

Pour le calcul, un nombre maximal de deux victimes de collision par an et par éolienne (valeur standard du projet de recherche, BRINKMANN et al. 2011) a été utilisé.

L'analyse ProBat s'est basée sur les données de température, de vent et d'activité des chauves-souris. La période d'enregistrement correspond aux critères théoriques et remplit ainsi les conditions préalables au calcul ProBat (voir paragraphe précédent Vérification des données). Le calcul a été effectué en excluant l'intervalle crépusculaire, car celui-ci ne contenait pas plus de 2 % de l'activité totale mesurée au cours du suivi.

ProBat calcule que **sans bridage, le nombre de victimes de collision pour l'éolienne 9 d'un diamètre de rotor de 70 m serait de 11,5 chauves-souris par an et par éolienne**. Les vitesses de démarrage calculées sur la base des années 2019 et 2020 sont les suivantes :

Vitesse de démarrage globale [m/s] (intervalle crépusculaire non pris en compte dans le calcul)

- Nombre de victimes par collision par an sans bridage favorable aux chauves-souris : **11,5**
- Nombre de victimes maximales acceptables par collision par an avec bridage : **< 2,00***
- Vitesse de démarrage globale [m/s] : **5,1**

* d'après BRINKMANN ET AL. (2011)

Vitesses de démarrage optimisées [m/s] (intervalle crépusculaire non pris en compte dans le calcul)

- Les vitesses de démarrage optimisées pour les mois de juin à novembre (période de référence du 01.06 au 15.11) sont présentées dans le tableau ci-dessous

Période de la nuit	Mois					
	6	7	8	9	10	11
0-0.1	5.1	5.3	5.4	5.2	4.5	2.7
0.1-0.2	5.6	5.9	6.0	5.7	5.0	3.4
0.2-0.3	5.2	5.4	5.7	5.5	4.6	2.9
0.3-0.4	5.2	5.3	5.6	5.5	4.4	2.6
0.4-0.5	5.1	5.2	5.4	5.4	4.4	2.4
0.5-0.6	4.7	4.9	5.0	5.0	4.1	1.6
0.6-0.7	4.8	5.0	5.0	5.0	4.1	1.6
0.7-0.8	4.3	4.6	4.5	4.5	3.8	1.3
0.8-0.9	4.2	4.6	4.5	4.6	3.8	1.4
0.9-1	2.4	3.3	3.2	3.3	1.6	0.8

Figure 102 Vitesses de démarrage optimisées calculées par ProBat pour le parc éolien

Les vitesses de démarrage optimisées selon les dixièmes de nuit de chaque mois vont de 0,8 à 6,0 m/s. La vitesse de démarrage la plus élevée doit uniquement être utilisée pendant le deuxième dixième de nuit (0.1-0.2) du mois d'août. À l'inverse, en novembre, les vitesses de démarrage déterminées par ProBat sont bien en dessous de la vitesse de démarrage des éoliennes, en particulier pour les cinq derniers dixièmes de nuit.

Depuis la version ProBat 7.1, une **limite de température** peut également être proposée. En plus des vitesses de démarrage calculées, la limite de température suivante peut être fixée afin de réduire la perte de rendement de l'éolienne : **≥ 6°C**. Ainsi, l'éolienne devrait être arrêtée lorsque la vitesse du vent est **inférieure** (<) à la vitesse de démarrage et que la température extérieure au niveau de la nacelle est **égale ou supérieure** (≥) à la limite de température indiquée.

➤ Comparaison de la mesure retenue avec les tests expérimentaux du volet 2 d'OPRECh

Avec l'ensemble des données de suivis implémentées dans l'application Probat, et pour atteindre l'objectif de ne pas dépasser deux mortalités de chauves-souris par éolienne et par an, le modèle Renebat retient un seuil de vitesse de vent de régulation à 5,1 m/s en moyenne. Un pattern de régulation avec ce seuil de vent n'a pas été précisément testé par les modalités de régulation du volet 2. Mais c'est une modalité intermédiaire entre les modalités n° 3 (4,5 m/s et 10°C) et n° 4 (6 m/s et 10°C) qui ont été testées.

- La modalité n°3 aurait théoriquement permis de réduire de 61% la mortalité du parc non régulé avec 7 mortalités résiduelles (6 pipistrelles et 1 noctule de Leisler). Rappelons que ces mortalités résiduelles brutes sont jugées bien plus représentatives de la mortalité réelle que pour un suivi classique grâce aux protocoles de suivis expérimentaux hors normes.
- La modalité n°4 aurait théoriquement permis de réduire de 100 % la mortalité du parc non régulé.

Autrement dit, avec un niveau de régulation intermédiaire, la mesure de régulation préconisée via la méthode Renebat aurait permis d'aboutir à une réduction de la mortalité de 61% à 100% des mortalités du parc non régulé, soit 0 à 7 mortalités résiduelles sur l'ensemble du parc, soit 0 à 0,63 mortalités par éolienne (11 éoliennes) pour la période de suivi. Etant donné que la période de suivi (juillet – octobre) est la période la plus à risque, si on extrapole ce résultat ciblé sur cette période à risque à l'ensemble de la période d'activité principale estimée à 8 mois (mi-mars à mi-novembre), le niveau de mortalité résiduel de 0 à 1,68 chauves-souris par éolienne et par an serait probablement un peu surévalué. Mais dans tous les cas, ces **estimations sont cohérentes avec les objectifs quantitatifs affichés et permettent de valider la pertinence de la démarche.**

3.4.4. Simulation du mode de régulation prédictif basé sur une approche comportementale (Exen)

Le cheminement d'une méthode prédictive pour le dimensionnement d'un pattern de régulation des éoliennes basé sur une approche comportementale fine est testé ci-après d'après les méthodes du bureau d'étude EXEN sur la base des données expérimentales d'OPRECh. Une chiroptérologue d'Exen (A. Langlois, références précisées en annexe 14) a ainsi déroulé ce processus de dimensionnement sans connaissance préalable des résultats de tests des modalités de régulation du volet 2 d'OPRECh. Elle a pu choisir les éoliennes qui lui paraissaient pertinentes à équiper pour un suivi d'activité de référence. Les données d'activité correspondantes et de mortalité des années passées (avant régulation) lui ont alors été transmises pour qu'elle puisse mener son analyse.

Tester l'effet d'un pattern de régulation sur l'activité de référence **est au cœur des processus de dimensionnement de la mesure par « tâtonnement »**. Il s'agit en fait de simuler différents types de patterns et de faire évoluer les seuils pour voir à chaque fois ;

- Quelle **proportion de l'activité** de référence aurait été prise en compte et quelle proportion serait restée à risque (pourcentage de protection théorique) ?
- Quel **niveau d'activité** (en valeur d'intensité) aurait été pris en compte et non pris en compte (activité résiduelle restant à risque) ?
- Comment se serait **exprimée la mesure sur la chronologie d'activité de référence** et comment se présente la chronologie d'activité résiduelle (restant à risque) vis-à-vis **d'objectifs qualitatifs de protection** (espèces, groupes d'espèces, périodes, pics d'activité de pipistrelles, transits migratoires de noctules...) ?

L'analyse de l'évolution de ces 3 critères est intéressante pour affiner la représentation de l'efficacité attendue de la mesure. Pour être pertinentes, ces simulations doivent tester **l'effet combiné des différents paramètres climatiques** du pattern retenu sur la chronologie d'activité de référence.

3.4.4.1. Choix des éoliennes utilisées pour les analyses

Le choix des éoliennes est un critère de départ important pour l'étude de l'activité en hauteur des chiroptères et le dimensionnement ultérieur d'une mesure de régulation cohérente. Pour le dimensionnement de la régulation des machines par le bureau d'étude EXEN, le choix se serait porté sur les éoliennes suivantes :

- Arques 1 : E1
- Arques 2 : E6
- Arques 2 bis : E7
- Arques 3 : E9

Ces éoliennes auraient été choisies en prenant en compte plusieurs critères.

- Pour Arques 1 & 2, les éoliennes E1 et E6 ont été les plus accidentogènes en 2018. Elles sont aussi caractérisées par des combes humides à proximité ou en pied de machine (cas de E1) ;
- Pour Arques 2 bis et 3, le parc n'était pas encore construit en 2018. Le suivi de 2019 était la première année de suivi de la mortalité sur ces parcs. Il est donc nécessaire de faire abstraction des données de mortalité et de considérer uniquement le contexte paysager autour des éoliennes. Pour Arques 2 bis, E7 est caractérisée par une haie à proximité. Pour Arques 3, E9 est située sur un col avec de part et d'autre des vallées humides.

Les éoliennes présentées précédemment auraient été choisies pour dimensionner un pattern de régulation prédictif basé sur une approche comportementale. Toutefois, dans une optique de comparaison pertinente des résultats, les analyses se porteront dans un premier lieu sur les éoliennes E4 et E9, ces dernières ayant été choisies par le bureau d'étude KJM pour dimensionner la régulation des parcs d'Arques avec l'outil ProBat.

Ce seront donc les données météorologiques issues des éoliennes E4 et E9 qui seront utilisées. Le pattern de régulation prédictif sera dimensionné seulement sur la période de juillet à septembre, le suivi de mortalité ayant été réalisé uniquement durant cette période.

3.4.4.2. Régulation préconisée sur la base du suivi 2019

3.4.4.2.1. Présélection des seuils de paramètres via analyse séparée de leur influence sur l'activité (paramètres testés un par un)

Le choix des seuils des différents paramètres du pattern de régulation sont d'abord retenus sur la base d'une analyse séparée de l'effet de chacun de ces seuils (ex. vitesse de vent, températures, horaires...) sur le référentiel d'activité. Pour chaque paramètre, un graphique de corrélation est proposé avec l'activité de référence et le seuil est retenu pour faire en sorte de couvrir entre 80 et 90% majorité de l'activité. Cette analyse est menée par groupes d'espèces et par types de comportements de vols (espèces de haut vol en transits ponctuels plus ou moins réguliers, espèces de lisières en vol « classique » le long des corridors de lisières, espèces de lisières qui se déconnectent des corridors pour prendre de l'altitude, pics d'activité ponctuel massif...).

➤ Choix du seuil de vitesse de vent

Concernant le choix du seuil de vent, celui-ci se base sur l'analyse de l'activité relevée en hauteur vis-à-vis des vitesses de vent relevées à hauteur de nacelle.

- Pour E4 : plus de 80% de l'activité des espèces de lisières relevées sous des vitesses de vent de 3,5 m/s et plus de 90% sous 4,5 m/s. Pour les espèces de haut vol, environ 80% de leur activité est relevée sous des vents de 4,5 m/s et plus de 90% de leur activité est relevée sous des vitesses de vents de 5,5 m/s ;
- Pour E9 : 80% de l'activité des espèces de lisières relevées sous des vitesses de vent de 4,5 m/s, plus de 90% sous 5 m/s. Pour les espèces de haut vol, plus de 80% de leur activité est relevée sous des vents de 4,5 m/s et 90% de leur activité est relevée sous des vents de 5 m/s.

A ce stade de l'analyse apparaît une différence de seuils selon les éoliennes. Se pose donc la question de proposer une régulation différenciée entre les 2 lignes d'éoliennes constituant les parcs d'Arques, qui sont relativement éloignées l'une et l'autre.

En ce qui concerne l'intensité de l'activité en hauteur :

- Pour E4 : entre juillet et septembre, l'activité des espèces de haut vol est très régulière sur cette période, même si de faible intensité. L'activité des espèces de lisière est plus importante et plus régulière entre mi-août et fin septembre ;
- Pour E9 : entre juillet et septembre, l'activité des espèces de haut vol est très régulière sur cette période, même si de faible intensité. L'activité des espèces de lisière est très hétérogène, mais plus régulière entre mi-août et fin septembre (quelques nuits de niveau modéré, pas de pics).

➤ Choix de la température

Le choix du seuil de température se base sur l'analyse de l'activité en hauteur vis-à-vis des températures relevées à hauteur de nacelle.

- Pour E4 : plus de 80% de l'activité est relevée pour des températures égales ou supérieures à 12°C ; plus de 95% pour des températures supérieures à 6°C ;
- Pour E9 : Activité relevée à partir de 16°C. Cela est étonnant et constitue un seuil relativement élevé par rapport aux situations habituelles.

➤ Choix des horaires d'activation

Le choix des horaires d'activation est défini en fonction du rythme d'activité des chauves-souris enregistré à hauteur de rotor.

- Pour E4 (entre juillet et septembre) : 90% entre 1 heure après le coucher du soleil et 1 heure avant le lever du soleil ;
- Pour E9 (entre juillet et septembre) : 90% entre 30 minutes après le coucher du soleil et 4 heures avant le lever du soleil

En extrapolant par ligne d'éolienne :

- Pour la ligne Arques 1 & 2 => entre 1 heure après le coucher du soleil et 1 heure avant le lever du soleil
- Pour la ligne Arques 2bis et 3 => entre 30 minutes après le coucher du soleil et 1 heures avant le lever du soleil (pour être conservateur)

➤ Choix de la période de régulation

Le choix de la période de régulation passe par la considération du nombre de chauves-souris retrouvés entre début juin et début octobre (suivi mené entre mi-mai et fin octobre) au cours du suivi de 2019. Les cadavres retrouvés lors de cette période correspondent à :

- 26 cadavres de pipistrelles : 7 en juin, 3 en juillet, 6 en août, 9 en septembre et 1 en octobre
- 2 cadavres de noctules : 1 en juillet et 1 en octobre

En termes de répartition des mortalités par portion de parc :

- 8 chauves-souris ont été retrouvées sous Arques 1 et 2 dont 1 Noctule de Leisler, et 20 chauves-souris ont été retrouvées sous arques 2 bis et 3 dont 1 Pipistrelle de Nathusius et 1 Noctule de Leisler.

Concernant l'activité générale des chauves-souris, celle-ci est régulière en nacelle de juillet à septembre au niveau d'E4 et E9. A noter, un pic d'activité de niveau fort est enregistré au niveau de E4 le 3 septembre

Deux types de régulation sont ainsi préconisées à l'issue de cette première année de suivi :

- ➔ Une régulation conventionnelle entre début mai et fin mai et entre début octobre et fin octobre (par précaution, aucun recul sur le niveau d'activité en hauteur, même si pas de mortalité retrouvée)
- ➔ Régulation multicritère de juillet à septembre

➤ Plan de régulation retenu

Finalemment, par une approche séparée de chaque paramètre climatique, les patterns potentiellement retenus sont les suivants.

Pour Arques 1 et 2, régulation des machines pour les conditions suivantes :

- Du 1^{er} mai au 30 juin :
 - Vitesse de vent inférieure ou égale à 6 m/s et,
 - Température égale ou supérieure à 10°C et,
 - D'une heure après le coucher du soleil à une heure avant le lever du soleil et,
 - Pour toutes les éoliennes (E1 à E6)
- Du 1^{er} juillet au 30 septembre :
 - Vitesse de vent inférieure ou égale à 5 m/s et,
 - Température égale ou supérieure à 10°C et,
 - D'une heure après le coucher du soleil à une heure avant le lever du soleil et,
 - Pour toutes les éoliennes (E1 à E6)
- Du 1^{er} octobre au 31 octobre :
 - Vitesse de vent inférieure ou égale à 6 m/s et,
 - Température égale ou supérieure à 10°C et,
 - D'une heure après le coucher du soleil à une heure avant le lever du soleil et,
 - Pour toutes les éoliennes (E1 à E6)

En termes de pourcentage d'activité couverte, pour la période du 1^{er} juillet au 30 septembre, cela représente 85% de l'activité totale couverte avec un seuil à 5,5 m/s, 80% avec un seuil à 5 m/s, 78% avec un seuil à 4,5 m/s, 74% avec un seuil à 4 m/s

Pour Arques 2bis et 3 : Régulation des machines pour les conditions suivantes :

- Du 1^{er} mai au 30 juin :
 - Vitesse de vent inférieure ou égale à 6 m/s et,
 - Température égale ou supérieure à 10°C et,

- o De 30 minutes après le coucher du soleil à une heure avant le lever du soleil et,
- o Pour toutes les éoliennes (E7 à E11)
- Du 1^{er} juillet au 30 septembre :
 - o Vitesse de vent inférieure ou égale à 5 m/s et,
 - o Température égale ou supérieure à 10°C et,
 - o De 30 minutes après le coucher du soleil à une heure avant le lever du soleil et,
 - o Pour toutes les éoliennes (E7 à E11)
- Du 1^{er} octobre au 31 octobre :
 - o Vitesse de vent inférieure ou égale à 6 m/s et,
 - o Température égale ou supérieure à 10°C et,
 - o De 30 minutes après le coucher du soleil à une heure avant le lever du soleil et,
 - o Pour toutes les éoliennes (E7 à E11)

En termes de pourcentage d'activité couverte, pour la période du 1^{er} juillet au 30 septembre, cela représente 92% de l'activité totale couverte avec un seuil à 5,5 m/s, 90% avec un seuil à 5 m/s, 76% avec un seuil à 4,5 m/s, 57% avec un seuil à 4 m/s.

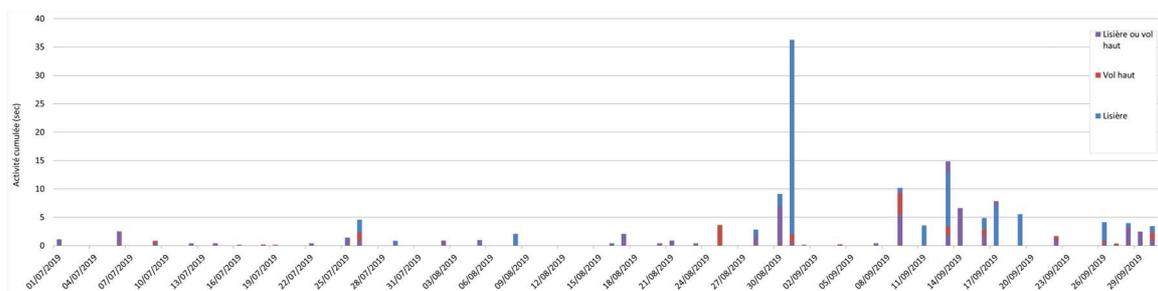
3.4.4.2.2. Vérification de l'effet global attendu du pattern retenu sur la chronologie d'activité de référence (paramètres combinés)

Une fois les patterns de régulation prédéfinis sur la base d'une analyse séparée de l'effet de chaque paramètre sur l'activité, la pertinence de ces choix est vérifiée sur la base d'une approche combinée des paramètres sur la chronologie d'activité. C'est alors l'occasion de vérifier à la fois le pourcentage d'activité protégé et restant à risque, mais aussi le niveau d'activité protégé et restant à risque, et encore les périodes, groupes d'espèces et comportements protégés et restants exposés par le pattern.

Simulation sur jeux de données 2019, pour Arques 1 et 2 (basé sur le suivi de l'éolienne E4)

- Pour l'éolienne E4, le pattern retenu aurait permis de couvrir plus de 80% de l'activité totale des chauves-souris, correspondant à plus de 80% des espèces de haut vol et 85 % des espèces de lisières. Le niveau d'activité résiduel restant à risque (toutes espèces) serait de 144 secondes sur l'ensemble de la période, soit plus de 2 minutes cumulées pour l'ensemble du parc entre juillet et octobre 2019. L'analyse chronologique montre qu'un pic (fin août) n'aurait été que partiellement pris en compte et que le résiduel à risque concernerait surtout la période de fin août à fin septembre.

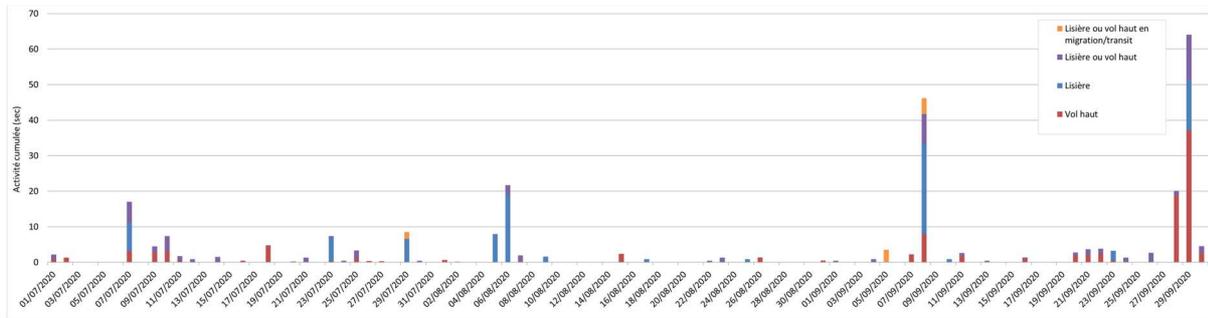
Activité	Groupe de vol				Total général
	Lisière ou vol haut	Vol haut	Lisière	Lisière ou vol haut en migration/transit	
Activité cumulée restante à risque	46,79	17,63	76,73	2,85	144,00
Activité cumulée protégée	108,21	71,90	423,08	11,78	614,98
Total	155,01	89,53	499,81	14,64	758,98
Pourcentage d'activité protégée	69,81	80,31	84,65	80,51	81,03



Simulation sur jeux de données 2020, pour Arques 1 et 2 (basé sur le suivi de l'éolienne E4)

- Pour l'éolienne E4, nous avons vu que l'activité mesurée en 2020 est presque trois fois plus importante qu'en 2019. Pour autant, le pattern retenu aurait protégé avec un taux globalement plus élevé (87,4%), mais de façon moins équilibrée entre les espèces de haut-vol (60%) et les espèces de lisières (92%). Le niveau d'activité résiduel restant à risque (toutes espèces) serait de 271 secondes cumulées sur l'ensemble de la période, soit 4,5 minutes pour l'ensemble du parc entre juillet et octobre 2020, dont 1/3 concernant les espèces de haut-vol (plus de 100s résiduelles à risque). L'analyse chronologique permet de montrer que c'est surtout en toute fin de période (fin septembre début octobre) que l'activité résiduelle des espèces de haut vol se serait produite. Au vu de ces éléments, se pose la question d'ajuster la mesure en la rendant plus conservatoire pour cette période. Il s'agirait alors éventuellement d'augmenter le seuil de vent et de prolonger la mesure (jusqu'au 15 novembre à priori).

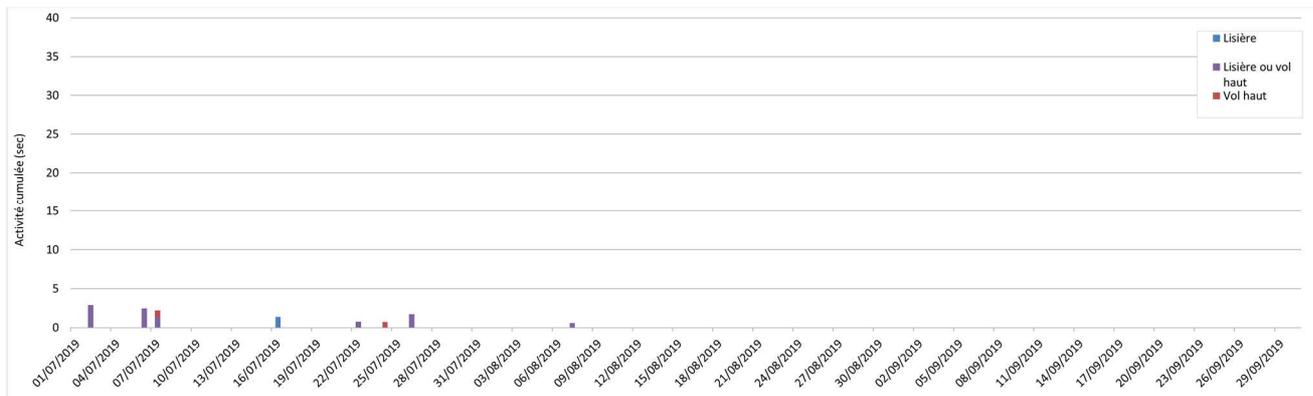
Activité	Groupe de vol						Total général
	Vol bas	Vol haut	Lisière	Lisière ou vol haut	Lisière ou vol haut en migration/transit	Vol haut en migration/transit	
Activité cumulée restante à risque	0,00	102,18	94,68	64,18	9,99	0,00	271,04
Activité cumulée protégée	4,63	154,66	1128,59	177,32	288,68	126,57	1880,44
Total	4,63	256,84	1223,27	241,50	298,67	126,57	2151,48
Pourcentage d'activité protégée	100,00	60,22	92,26	73,42	96,65	100,00	87,40



Simulation sur jeux de données 2019, pour Arques 2bis et 3 (basé sur le suivi de l'éolienne E9)

- Pour l'éolienne E9, le pattern retenu aurait permis de couvrir plus de 90% de l'activité totale des chauves-souris, correspondant à plus de 93% des espèces de haut vol et 97 % des espèces de lisières. Le niveau d'activité résiduel restant à risque (toutes espèces) serait alors très faible (13s cumulées) sur l'ensemble de la campagne de 2020. L'analyse chronologique montre que toute la période d'activité initialement la plus exposée serait ainsi protégée.

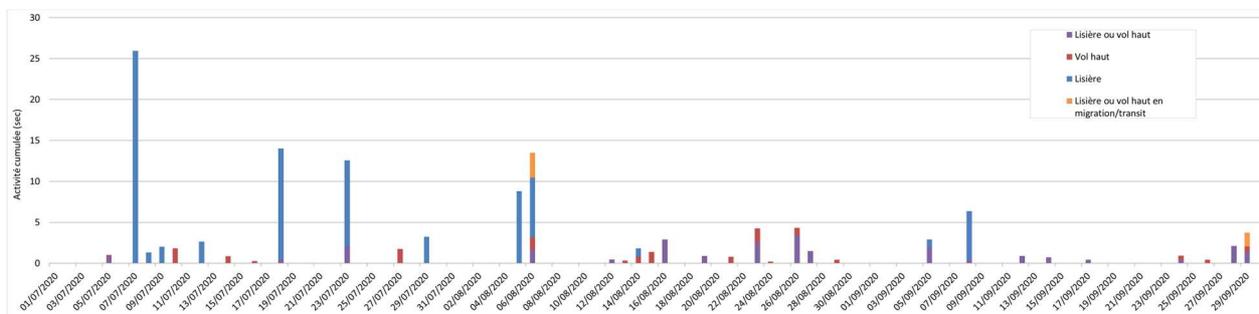
Activité	Groupe de vol			Total général
	Lisière	Lisière ou vol haut	Vol haut	
Activité cumulée protégée	46,39	49,57	22,97	118,93
Activité cumulée restante à risque	1,36	9,80	1,63	12,79
Total	47,74	59,37	24,60	131,71
Pourcentage d'activité protégée	97,16	83,50	93,36	90,29



Simulation sur jeux de données 2020, pour Arques 2bis et 3 (basé sur le suivi de l'éolienne E9)

- Pour l'éolienne E9, le pattern retenu aurait permis de couvrir plus de 80% de l'activité totale des chauves-souris, correspondant à plus de 88% des espèces de haut vol et 81 % des espèces de lisières. Le niveau d'activité résiduel restant à risque (toutes espèces) serait alors de 128 secondes (2 minutes) sur l'ensemble de la campagne de 2020. L'analyse chronologique montre que cette activité résiduelle correspondrait surtout à quelques pics de pipistrelles fin juillet.

Activité	Groupe de vol				Total général
	Lisière ou vol haut	Vol haut	Lisière	Lisière ou vol haut en migration/transit	
Activité cumulée restante à risque	25,30	14,65	83,10	4,71	127,76
Activité cumulée protégée	59,35	108,31	358,43	8,80	534,89
Total	84,65	122,96	441,53	13,50	662,65
Pourcentage d'activité protégée	70,11	88,09	81,18	65,15	80,72



3.4.4.2.3. Comparaison de la mesure retenue avec les tests expérimentaux du volet 2 d'OPRECh

Pour pouvoir comparer le pattern de régulation retenu par la méthode prédictive avec les résultats des tests expérimentaux du volet 2 d'OPRECh, et dans la mesure où le pattern proposé est décomposé par périodes, nous proposons de retenir une moyenne de seuil de vitesse de vent. Ainsi, pour un pattern qui retient 6 m/s du 1^{er} mai au 30 juin, 5 m/s du 1^{er} juillet au 30 septembre puis 6 m/s du 1^{er} octobre au 31 octobre, cela correspond à une moyenne de 5,5 m/s par jours. Un pattern de régulation avec ce seuil de vent n'a pas été précisément testé par les modalités de régulation du volet 2. Mais c'est une modalité située entre les modalités n° 3 (4,5 m/s et 10°C) et n°4 (6 m/s et 10°C) qui ont été testées, avec toutefois un positionnement plus proche de la modalité n°4.

- La modalité n°3 aurait théoriquement permis de réduire de 61% la mortalité du parc non régulé avec 7 mortalités résiduelles (6 pipistrelles et 1 noctule de Leisler). Rappelons que ces mortalités

résiduelles brutes sont jugées bien plus représentatives de la mortalité réelle que pour un suivi classique grâce aux protocoles de suivis expérimentaux hors normes ;

- La modalité n°4 aurait théoriquement permis de réduire de 100 % la mortalité du parc non régulé.

Autrement dit, avec un niveau de régulation intermédiaire mais proche de la modalité n°4, la mesure de régulation préconisée via la méthode prédictive basée aurait permis d'aboutir à une réduction de la mortalité de 61% à 100% des mortalités du parc non régulé, soit 0 à 7 mortalités résiduelles sur l'ensemble du parc, soit 0 à 0,63 mortalités par éolienne (11 éoliennes) pour la période de suivi. La période de suivi (juillet – octobre) étant la période la plus à risque, si on extrapole ce résultat sur une période d'activité principale estimée à 8 mois (mi-mars à mi-novembre), le niveau de mortalité résiduel de 0 à 1,68 chauves-souris par éolienne et par an est probablement un peu surévalué. **En réalité, avec un pattern retenu plus proche de la modalité n°4, les le niveau de mortalité résiduel à attendre aurait été plus proche de 0 que de 1,68 chauves-souris par éolienne et par an.**

Enfin, le seuil de vent moyen retenu (5,5 m/s) par le mode prédictif comportemental est très cohérent, et légèrement plus conservateur sur cet exemple que celui retenu à l'aide du mode prédictif du modèle Renebat (5,1 m/s). L'effet sur la perte de production n'est pas testé ici, mais le caractère légèrement plus conservateur du mode prédictif comportemental devrait largement être compensé par l'intégration de la température qui n'est pas encore implémenté dans le modèle Renebat.

Enfin, au-delà d'une simple approche moyennée du seuil de vitesse de vent et du nombre de mortalités résiduel par éolienne et par an qui en résulte, **l'approche comportementale permet aussi** de simuler et d'analyser finement ;

- comment se serait traduit l'efficacité de la mesure pour les différents périodes de la chronologie d'activité, selon les groupes d'espèces ou les espèces, selon les types de comportements (pics d'activité ponctuels de pipistrelles, transits plus ou moins récurrents de noctules, bruit de fond d'activité de base d'espèces de lisières...). Sur l'exemple testé, cette approche aurait notamment permis de soulever une certaine fragilité de la mesure pour l'activité tardive des noctules mesurée au niveau de E4 en 2020, ce qui aurait invité à étaler la mesure sur le mois de novembre avec une augmentation des seuils sur cette période.
- comment se serait traduit la mesure sur les différents jeux de données des deux éoliennes équipées d'enregistreurs, et sur plusieurs années, et donc de valider la cohérence du choix de la régulation avec l'évolution spatio-temporelle de l'activité.

A retenir de cette partie

Enfin, la rétro analyse de quelques différentes pratiques de dimensionnement de la mesure de régulation montre 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.

3.4.5. 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 d'OPRECh (un passage tous les jours pendant trois mois) permet d'obtenir une bonne estimation du nombre total de mortalités causées par les éoliennes d'Arques au cours de cette période. En effet, bien que le nombre de cadavres retrouvés dépende de l'efficacité du chercheur et du pourcentage de prospection, un passage tous les jours augmente la probabilité qu'un cadavre qui n'ait pas été trouvé lors de la visite de la veille soit retrouvé le lendemain, si le cadavre n'a pas été prédaté entre temps. Dès lors, le nombre de mortalités brutes retrouvées lors des trois mois de suivi peut être considéré comme relativement proche (potentiellement légèrement sous-estimé) du nombre de mortalités réellement occasionnées par le parc. Aussi, il est alors possible de simuler les résultats qui auraient pu être obtenus pour des pressions de suivi inférieures à une visite par jour et de calculer le nombre de mortalités brutes retrouvées pour une pression de suivi donnée ainsi que le taux de mortalité associé.

3.4.5.1. Effet de la pression de suivi sur la mortalité brute retrouvée

Dans cette optique, trois pressions de suivi différentes ont été simulées sur les résultats des suivis de mortalité des deux parties des parcs d'Arques (Arques 1&2, ligne Ouest, et Arques 2bis et 3, ligne Est). Les périodes de suivi simulées s'étendent toutes du 1^{er} juillet au 30 septembre conformément au suivi réalisé dans le cadre du volet 2 d'OPRECh, et les pressions de suivi retenues sont les suivantes :

- Quatre visites aléatoires, pour simuler les pressions de suivis mises en œuvre avant le protocole national de 2018,
- Une visite par semaine, soit 13 visites. Les dates de visites ont été générées de façon à obtenir une moyenne de sept jours entre deux visites, avec un écart-type de 1 pour introduire de possibles variations pouvant exister dans les plannings de suivi.
- Deux visites par semaine, soit 26 visites. Les dates de visites ont été générées de façon à obtenir une moyenne de 3,5 jours entre deux visites, avec un écart-type de 0,5 pour introduire de possibles variations pouvant exister dans les plannings de suivi.

Chacune de ces modalités de pression de suivi a été simulée à 100 reprises (réplica) pour obtenir une large gamme de plannings de suivis différents.

Ces dates de visites simulées sont ensuite comparées au planning des mortalités de chiroptères retrouvées sur les parcs d'Arques en 2019. Pour simplifier les calculs, une persistance des cadavres de 3 jours a été définie. Ainsi, pour toute date de visite simulée correspondant au jour de la découverte d'un cadavre lors du suivi réel, au lendemain ou au surlendemain, il a été considéré qu'une mortalité était découverte (avec le biais possible que la diminution du nombre de cadavres ne soit pas linéaire dans le temps). Par Ains, pour une mortalité de chiroptère retrouvée lors du suivi réel le 17 juin sur la ligne Ouest des parcs d'Arques, tout planning de suivi comportant le 17, 18 ou 19 juin sera associé à la découverte de cette mortalité. Finalement, un nombre total de mortalités brutes découvertes a été calculé pour chacun des réplicas de chaque pression de suivi simulée.

Pour rappel, sept mortalités brutes ont été retrouvées en 2019 sous les éoliennes du parc Ouest (Arques 1 & 2). Pour un suivi de 4 visites réparties sur trois mois, le nombre de mortalité brutes moyen retrouvé sur ce parc a été estimé à 0,8 mortalités (e.t. $\pm 1,1$). Pour un suivi de 1 visite par semaine réparties sur trois mois, le nombre de mortalité brutes moyen retrouvé a été estimé à 3,1 mortalités (e.t. $\pm 1,3$). Pour un suivi de deux visites par semaine réparties sur trois mois, le nombre moyen de mortalités brutes retrouvées a été estimé à 6 mortalités (e.t. $\pm 1,2$). La Figure 103 présente ces résultats vis-à-vis du nombre réel de mortalités retrouvées sous les éoliennes des parcs d'Arques Ouest en 2019.

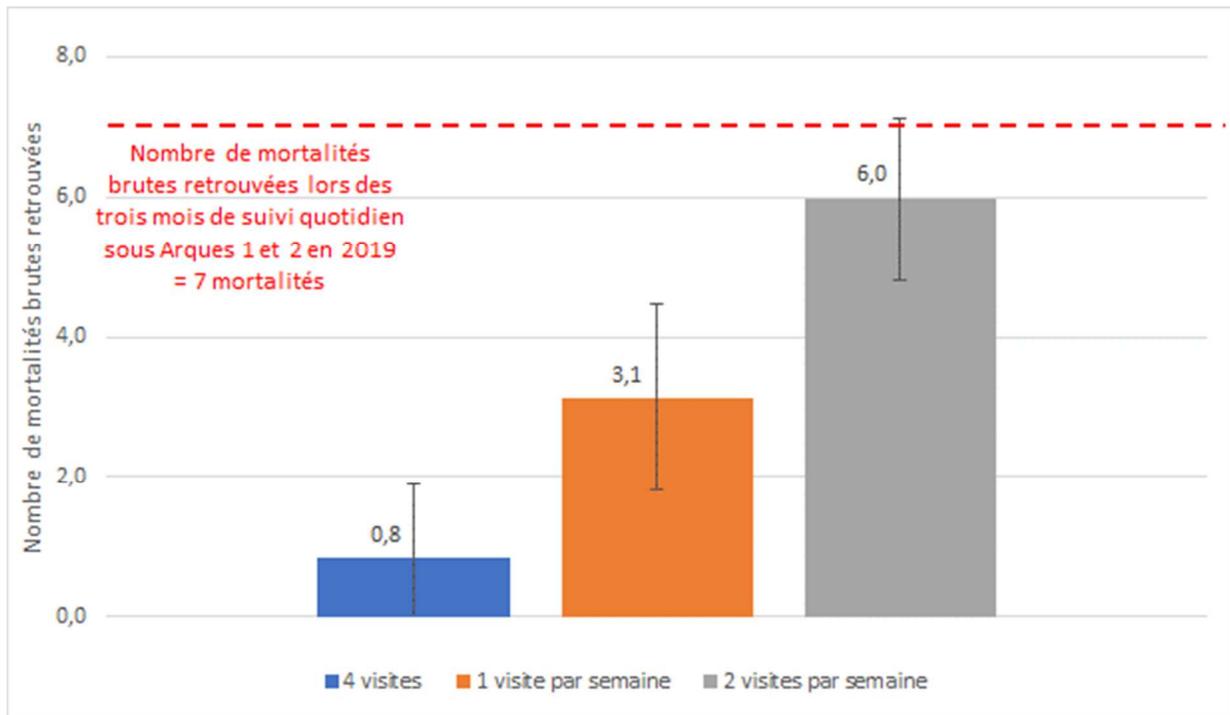


Figure 103 : Nombre de mortalités brutes retrouvées pour des simulations de 3 pressions de suivi différentes sur le jeu de données du suivi mortalité d'Arques 1 & 2 en 2019 (100 répliques pour chaque pression de suivi simulée)

De même, 12 mortalités brutes ont été retrouvées en 2019 sous les éoliennes du parc Est (Arques 2bis & 3). Pour un suivi de 4 visites réparties sur trois mois, le nombre moyen de mortalité brutes retrouvées sur ce parc a été estimé à 1,8 mortalités (e.t. $\pm 1,5$). Pour un suivi d'une visite par semaine réparties sur trois mois, le nombre moyen de mortalités brutes retrouvées a été estimé à 5,1 mortalités (e.t. $\pm 2,2$). Pour un suivi de deux visites par semaine réparties sur 3 mois, le nombre moyen de mortalités brutes retrouvées a été estimé à 10,2 mortalités (e.t. $\pm 1,6$). La Figure 104 présente ces résultats vis-à-vis du nombre réel de mortalités retrouvées sous les éoliennes des parcs d'Arques Est en 2019.

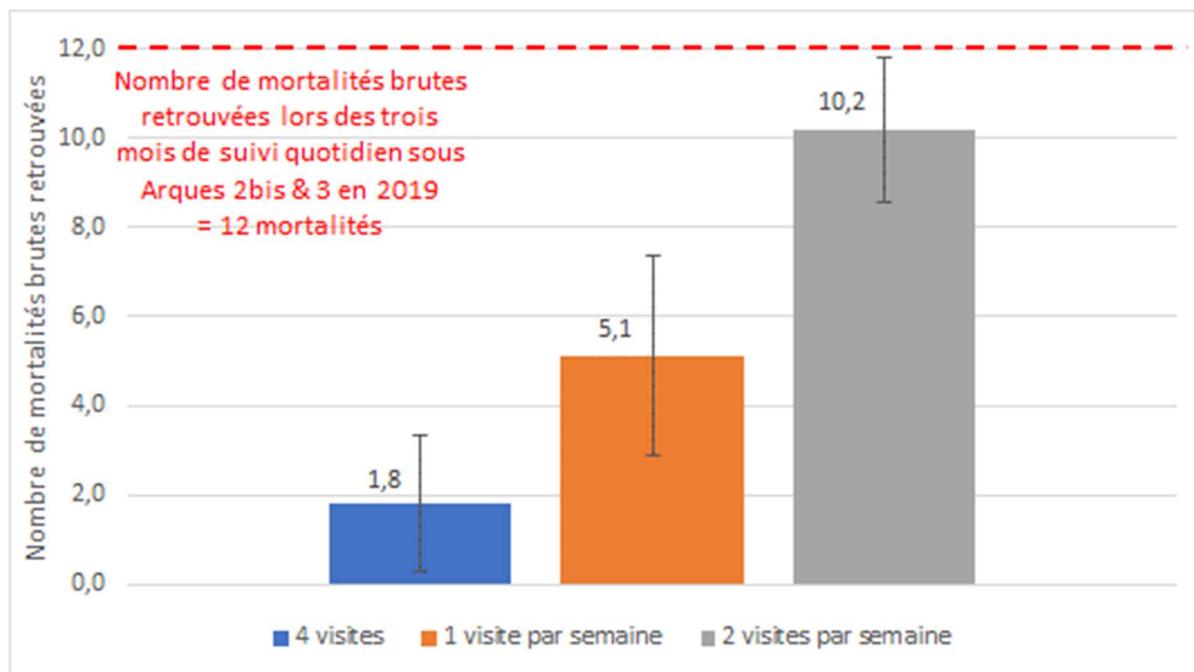


Figure 104 : Nombre de mortalités brutes retrouvées pour des simulations de 3 pressions de suivi différentes sur le jeu de données du suivi mortalité d'Arques 2bis & 3 en 2019 (100 répliques pour chaque pression de suivi simulée)

Logiquement, plus la pression de suivi est importante, plus le nombre de cadavres découverts est grand et s'approche du nombre de cadavre réellement découverts sur les parcs d'Arques pendant les trois mois de suivi quotidiens. Pour les simulations de quatre visites réparties sur la période de juillet à septembre, le nombre simulé de cadavres n'a rien de cohérent avec le nombre de cadavres réellement retrouvés, et correspond en moyenne à 15% de la mortalité réelle. Pour les simulations d'une visite par semaine, le nombre simulé de cadavres représente environ la moitié du nombre réel de cadavres. Pour les simulations de deux visites par semaine, le nombre simulé de cadavres représente entre 80 et 90 % du nombre réel de cadavres.

Ces différentes proportions de mortalités simulées par rapport à la mortalité réelle sont purement illustratives et ne peuvent être utilisées pour extrapoler les résultats de suivis de mortalité avec des pressions de suivi faibles. Toutefois, il est important de noter qu'une pression de suivi à deux visites par semaine permet d'obtenir un nombre de mortalités brutes plutôt cohérent par rapport au nombre réel de mortalités sur cette période de trois mois. Ce point permet d'étayer l'utilité de préconiser des suivis de la mortalité avec une pression de suivi plus marquée en période de forte activité des chiroptères. A terme, les résultats du suivi de mortalité permettront d'obtenir des résultats cohérents vis-à-vis du nombre réel de mortalités brutes, afin de mieux estimer les impacts du parc éoliens et les effets cumulés de l'éolien à différentes échelles, notamment en terme qualitatif pour des espèces patrimoniales à faibles tailles de populations. La mesure de régulation proposée à l'issue du suivi de mortalité et d'activité en hauteur sera alors bien plus cohérente vis-à-vis des enjeux réels sur le parc éolien.

3.4.5.2. Effet de la pression de suivi sur le taux de mortalité calculé

A la suite des simulations du nombre de mortalités retrouvé en fonction de la pression de suivi, l'analyse peut s'étendre à l'estimation du taux de mortalité sur la base du nombre de mortalité brutes simulé pour chaque pression de suivi.

Il est alors nécessaire de prendre en compte tous les paramètres qui jouent dans l'estimation du taux de mortalité et qui varient en fonction de la pression de suivi. Les paramètres pris en compte sont :

- **C** : le nombre de cadavres retrouvés. Il diffère pour chaque réplica de chaque simulation de pression de suivi calculé précédemment.
- **d** : valeur du taux de détection. Il a été estimé à 55% dans le cadre du suivi de la mortalité des parcs d'Arques en 2019. La valeur de 0,55 sera retenue pour chaque réplica car elle dépend uniquement des tests de détection réalisés sur site en 2019.
- **I** : Pas de temps du suivi. L'intervalle entre les différents passages est dépendant de la pression de suivi et du planning de suivi. Sa valeur est donc calculée pour chacun des réplicas en considérant le planning généré aléatoirement.
- **P** : Valeur du taux de persistance. Cette valeur dépend des résultats des tests de persistance réalisés sur site en 2019. En revanche, sa valeur varie aussi en fonction de l'intervalle entre les différents passages, le calcul prend donc en compte la valeur du paramètre I qui varie pour chaque réplica.
- **Tm** : Taux du temps de séjour moyen des cadavres sur le terrain. La valeur de ce paramètre a été fixée à 3 jours.
- **Î** : Sa valeur est égale à $\log(0.01) * tm$, et ne varie donc pas entre chaque réplica.
- **ê** : Sa valeur est égale à $\text{Min}(I/\hat{I}) / I$, et varie donc entre chaque réplica en fonction du I.
- **a** : Le coefficient de correction surfacique. Sa valeur varie en fonction du nombre de cadavres retrouvés dans chacun des cercles de prospection autour du mât de l'éolienne (0-14, 14-28, 28-42 et 42-56m de distance du mât). Sa valeur prend donc en compte la distance à laquelle chaque cadavre est retrouvé par rapport au mât, et varie donc entre chaque réplica en fonction des cadavres retrouvés.

Ainsi, en faisant varier simplement la pression de suivi, plusieurs estimateurs du taux de mortalité vont varier à leur tour. Le calcul du taux de mortalité réalisé ci-après pour chacun des réplicas prend en compte toutes ces variations de paramètres.

Le taux de mortalité a été calculé pour chacun des réplicas à l'aide de quatre formules couramment utilisées dans le cadre des suivis de mortalités au niveau des parcs éoliens : les formules d'Erickson adaptée, d'Erickson réelle, de Jones et d'Huso. Le détail de chacune des formules est le suivant :

- Erickson réelle : $N = (I \times C) / (tm \times d)$
- Erickson adaptée : $N = (I \times (C - C \times p)) / (tm \times d)$
- Jones : $N = C / (a \times d \times \exp[-0,5 \times I/tm] \times \hat{e})$
- Huso : $N = C / (a \times d \times [(tm \times (1 - \exp(-I/tm))) / I] \times \hat{e})$

Une moyenne a été effectuée à l'issue des différents calculs pour obtenir un taux de mortalité moyen par éolienne et par an pour chacun des réplicas.

Pour Arques 1 & 2, le taux de mortalité estimé à l'aide des formules ci-dessus (moyenne des quatre formules) et calculé à l'issue du suivi quotidien de juillet à septembre est de 4,49 chauves-souris tuées par éolienne et par an. Le taux de mortalité moyen calculé sur 100 réplicas à raison d'une pression de suivi de quatre passages sur la période de juillet à septembre aboutit à une moyenne de 10,4 chauves-souris tuées par éolienne et par an (moyenne des quatre formules). Pour une pression de suivi de 1 visite par semaine sur la période de juillet à septembre, le taux de mortalité aboutit à une moyenne de 7,1 chauves-souris tuées par éolienne et par an (moyenne des quatre formules). Pour un suivi de 2 visites par semaine, le taux de mortalité aboutit à une moyenne de 7,3 chauves-souris par éolienne et par an (moyenne des quatre formules).

La Figure 105 Représente par des boîtes à moustaches la distribution des taux de mortalité simulés pour chacune des pressions de suivi sur Arques 1 & 2 en 2019.

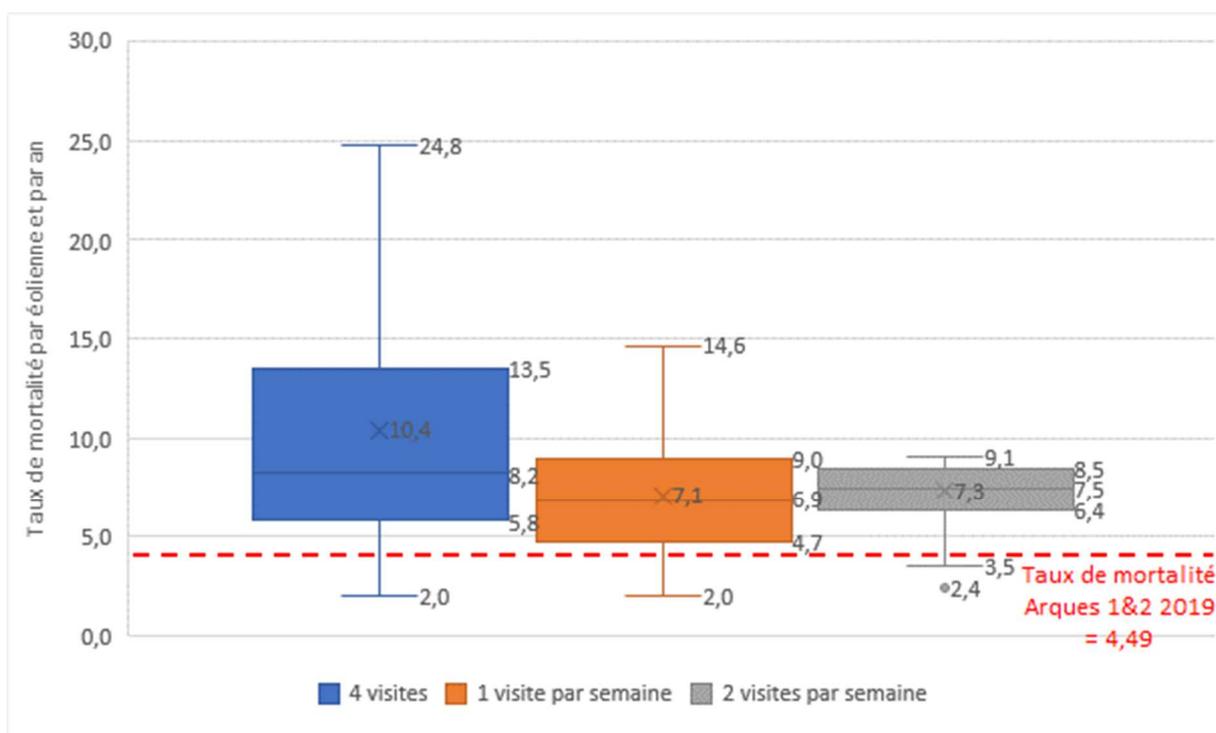


Figure 105 : Taux de mortalité par éolienne et par an simulé pour 100 réplicas de différentes pressions de suivi sur Arques 1 & 2, par rapport au taux de mortalité réel calculé en 2019.

Pour Arques 2bis & 3, le taux de mortalité réel, calculé à l'issue du suivi quotidien de juillet à septembre est de 12,42 chauves-souris tuées par éolienne et par an (moyenne des quatre formules). Le taux de mortalité moyen calculé sur 100 réplicas à raison d'une pression de suivi de 4 passages sur la période de juillet à septembre aboutit à une moyenne de 22,5 chauves-souris tuées par éolienne et par an (moyenne des quatre formules). Pour une pression de suivi de 1 visite par semaine sur la période de juillet à septembre, le taux de mortalité aboutit à une moyenne de 18,7 chauves-souris tuées par éolienne et par an (moyenne des quatre formules). Pour un suivi de 2 visites par semaine, le taux de mortalité aboutit à une moyenne de 18,4 chauves-souris par éolienne et par an (moyenne des quatre formules).

La Figure 106 représente par des boîtes à moustaches la distribution des taux de mortalité simulés pour chacune des pressions de suivi sur Arques 2bis & 3 en 2019.

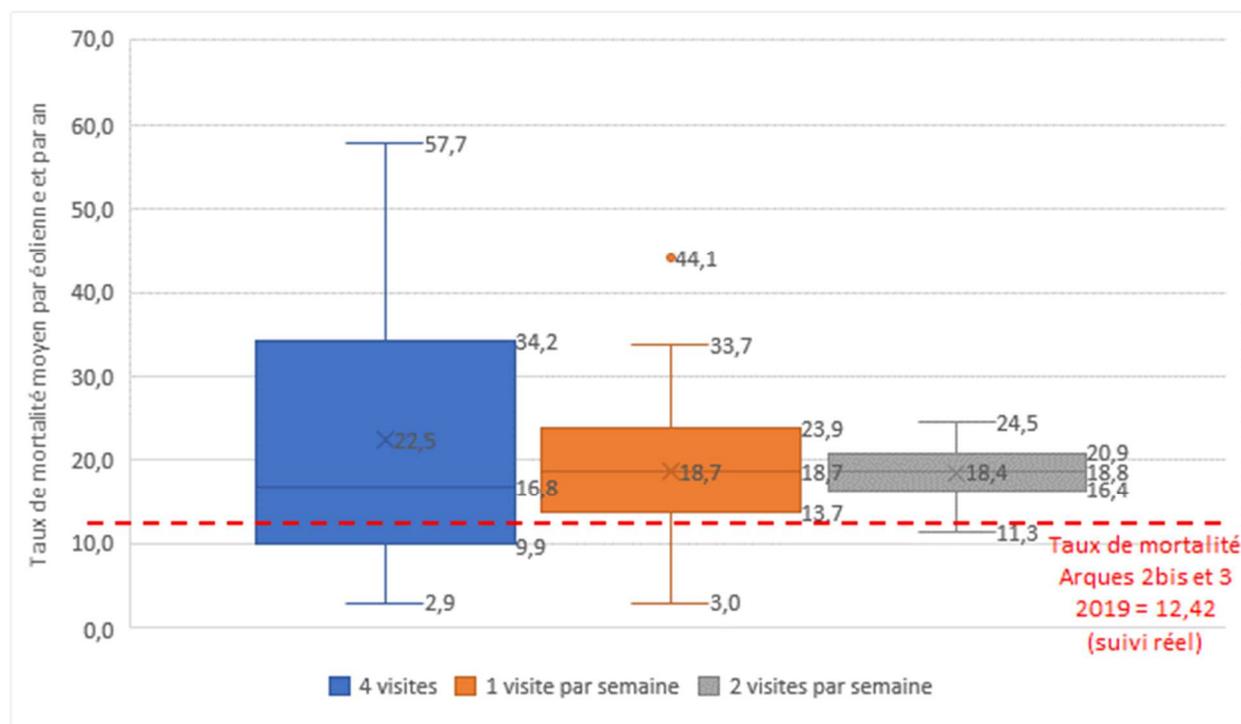


Figure 106 : Taux de mortalité par éolienne et par an simulé pour 100 répliques de différentes pressions de suivi sur Arques 2bis & 3, par rapport au taux de mortalité réel calculé en 2019.

Pour les deux parties des parcs d'Arques, il s'avère que le choix d'une pression de suivi à 4 visites réparties sur la période de juillet à septembre aboutit à l'estimation d'un taux de mortalité extrêmement variable, avec une grande majorité des résultats bien supérieurs au taux de mortalité calculé à l'issue des trois mois de passages quotidiens sur chacun des parcs. Par exemple, pour Arques 1 et 2, plus de 80% des taux de mortalité calculés sont surestimés par rapport au taux de mortalité réel. L'écart interquartile est aussi élevé, indiquant une forte dispersion des données. En considérant les taux de mortalité moyens pour les deux parcs, les simulations aboutissent à une surestimation de près de deux fois le taux de mortalité calculé pour une pression de suivi quotidienne en 2019.

Pour une pression de suivi à une visite par semaine pendant la période de juillet à septembre, l'écart interquartile se réduit par rapport à la pression de suivi à quatre visites. Cela indique une dispersion des données plus faible, et donc une meilleure précision dans le taux de mortalité calculé. La grande majorité des résultats de taux de mortalité simulés sont toutefois supérieurs au taux de mortalité réel. En considérant les taux de mortalité moyens pour les deux parcs, les simulations aboutissent à une surestimation de près de 1,5 fois le taux de mortalité calculé pour une pression de suivi quotidienne en 2019.

Pour une pression de suivi à deux visites par semaine pendant la période de juillet à septembre, l'écart interquartile est encore une fois réduit, témoignant d'une très faible dispersion des données et donc d'une estimation probablement convenable du taux de mortalité, ou au moins limitant les risques de sur- ou de sous-estimation du taux de mortalité. Ici encore, les taux de mortalité sont néanmoins surestimés par rapport au taux de mortalité réel. Ces différences s'expliquent par le fait qu'un suivi de mortalité quotidien a été effectué en 2019 pour aboutir au taux de mortalité réel, induisant très peu d'incertitudes dans le calcul du taux de mortalité. En considérant les taux de mortalité moyens pour les deux parcs (moyennes des quatre formules de calcul du taux de mortalité corrigé), les simulations aboutiraient à une surestimation de près de 1,5 fois le taux de mortalité calculé pour une pression de suivi quotidienne en 2019. Des analyses de simulation pure seraient nécessaires pour comprendre l'origine de cette surestimation.

A retenir de cette partie

Les différentes pressions de suivi simulées, que ce soit pour quatre visites en trois mois, une visite par semaine ou deux visites par semaine **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, les simulations ont montré que **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. Globalement, l'augmentation de la pression de suivi engendre une augmentation du nombre de mortalités brutes découvertes atteignant approximativement le nombre de mortalités brutes réel pour une pression de suivi de deux visites par semaine entre juillet et septembre. Pour cette même pression de suivi, le taux de mortalité calculé s'en trouve beaucoup plus précis, limitant les risques de sous- ou surévaluation du taux de mortalité.

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 de suivi entre juillet et septembre, ou août à octobre selon les sites à deux visites par semaines pour obtenir des données robustes et analysables à large échelle. **In fine, 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.** Cette précision accrue des suivis permettrait également de limiter le nombre d'années de suivi de la mortalité nécessaires pour comprendre l'impact réel d'un parc sur les populations de chiroptères.

Dans cette optique, l'application EolPower (<https://shiny.cefe.cnrs.fr/eolpower/>) a été développée récemment par T. Chambert et A. Besnard (CEFE) dans le but d'évaluer le niveau de précision des protocoles de suivi de la mortalité existants, ou de dimensionner de nouveaux protocoles de suivi précis et cohérents pour évaluer l'impact des mortalités sur les populations. Ce nouvel outil fait écho aux simulations présentées précédemment et se veut être un outil d'aide au dimensionnement des mesures de suivi pour comprendre l'impact réel des parcs éoliens sur les populations.

4. Volet 3 : Synthèse des contraintes et des leviers et recommandations vers une mesure de régulation optimisée

La synthèse des contraintes et des leviers et les recommandations vers une mesure de régulation optimisée à l'échelle nationale repose à la fois sur l'ensemble des éléments présentés dans les deux précédents volets bibliographiques (volet 1) et expérimentaux (volet 2), mais aussi sur une synthèse qualitative des retours d'interviews réalisés auprès des DREALs de France, et d'un échantillon de bureaux d'études et exploitants éoliens.

4.1. Recommandations générales vers une systématisation de la mesure de régulation en France, contraintes et leviers

Deux enseignements majeurs sont à retenir de l'ensemble des investigations engagées au niveau des volets 1 et 2 du programme d'OPRECh :

- Le premier enseignement est le fait que **moins de la moitié du parc éolien national bénéficierait en 2020 d'une mesure de régulation** en faveur des chiroptères (44% d'après le recensement effectué). Ces données sont issues d'un référencement poussé mais partiel sur le territoire national et il est possible que le pourcentage réel de parc régulés soit sensiblement différent. Toutefois, d'après les interviews réalisées auprès des DREALs, « *Il est quasiment certain que si une mesure de régulation est retenue, elle figure dans l'arrêté préfectoral, l'arrêté préfectoral complémentaire ou dans le suivi post-implantation.* ». Le recensement effectué peut ainsi être considéré comme représentatif.
- Le deuxième enseignement est le fait que, malgré le peu de cadrage, de prescriptions techniques nationales, lorsqu'elle est mise en place, **cette mesure est globalement efficace pour réduire la mortalité** des chauves-souris générée par les éoliennes. Quantitativement, selon les situations, elle peut réduire de l'ordre de 30 à 100% de la mortalité qui aurait été générée par le parc non régulé. Cette réduction de la mortalité est toutefois variable et est d'autant plus efficace que l'intensité de régulation de éoliennes est importante. Pour autant, que ce soit par une approche expérimentale (volet 2) ou par une revue bibliographique (volet 1), on constate qu'elle **peut être efficace même lorsqu'elle est peu conservatrice** (ex. faibles seuils de vent). Ainsi, le volet 1 (bibliographique) montre que la réduction de la mortalité peut être, dans certains cas, très élevée (jusqu'à -80%) dès la première année de mise en œuvre de la mesure et pour des seuils de vitesse de vent inférieurs à 5 m/s (voire parfois à 4 m/s) (cf. Figure 79 page 104). L'efficacité de la régulation à faible seuil de vitesse de vent est toutefois plus variable à ces vitesses que pour des vitesses de vent plus élevées. Les niveaux d'efficacité pour des régulations basées sur des seuils de 6-7m/s sont alors à la fois plus fiables et bien plus importants (-80 à -100%). Les niveaux intermédiaires (5-6 m/s) permettent ainsi de réduire de 50 à 60% les mortalités. Globalement, en moyenne, les mesures permettraient une réduction de l'ordre de 60% de la mortalité à l'échelle nationale. Le volet 2 (expérimental) montre que la réduction peut atteindre 56% de réduction de la mortalité pour un seuil de 3 m/s et 61% pour un seuil de 4,5 m/s (cf. Figure 91 page 126), et qu'avec un seuil de 6 m/s, aucune mortalité n'a été constatée. Ces résultats sont cohérents entre eux, et ils sont aussi cohérents avec les publications internationales pour lesquelles la plupart des mortalités, toutes espèces confondues, se produisent pour des vents inférieurs à 6 m/s (Arnett et al 2008, Amorin et al ; 2012, Koner nievergelt 2013, Arnett 2016). **Cette cohérence générale de l'efficacité de la mesure de régulation en France** est relayée par les retours d'interviews des bureaux d'étude. Elle est **d'autant plus encourageante** qu'elle est aussi probablement sous-évaluée du fait de l'importance des **problèmes de mise en œuvre** effective de la mesure lorsqu'elle est testée. Elle est aussi d'autant plus encourageante que ce type de mesure s'est **développée progressivement, sans cadre national, de façon empirique, par tâtonnement** et avec des disparités régionales importantes.

Finalement, dans un contexte de développement continu de l'éolien et où les préoccupations sont croissantes sur ses effets possibles sur les populations de chauves-souris (cf. chapitre 1.3.2 page 14), ces deux enseignements majeurs **devraient inciter à systématiser la mise en œuvre d'une mesure de régulation pour**

tous les parcs en exploitation et les nouveaux projets. En effet, 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.** Si l'éolien peut affecter aujourd'hui des populations de chauves-souris, alors, on peut espérer que cette mesure engagée de façon systématique pourrait permettre d'en réduire fortement l'effet et potentiellement à un niveau tel que les populations retrouveraient leur équilibre comme le montrent Friedenbergh & Frick, 2021 pour *Lasius cinereus* alors que cette espèce avait été identifiée comme très fortement menacée par le développement éolien aux USA précédemment (Frick et al. 2017).

Pour faire en sorte que l'ensemble du parc éolien français bénéficie d'une mesure de régulation efficace, différentes contraintes sont à lever selon les situations :

- **Pour ce qui concerne les parcs éoliens les plus récents**, la situation est plutôt favorable avec 72% des nouveaux projets qui semblent bénéficier d'une mesure (cf. chapitre 2.2.1.3 page 45). Il s'agit toutefois de faire en sorte que tout nouveau projet prévoit ce type de mesure. A défaut de suivi d'activité en hauteur à l'état initial, alors les modes préventifs peuvent être envisagés (mode préventif conventionnel voire mode préventif sous seuil de production).
- **Pour ce qui concernent les parcs les plus anciens**, qui n'avaient pas engagé de mesure à leur mise en service et qui ne l'ont pas fait par la suite, l'évolution de la réglementation peut aider à cette prise en compte des parcs anciens car elle exige depuis 2018 qu'un suivi d'impact soit réalisé tous les 10 ans et renouvelé avec mesure corrective tant que l'impact est jugé « significatif ». Ces phases régulières de suivis d'impacts sont donc des occasions d'envisager cette régulation. Au-delà des exigences réglementaires qui prennent du temps, c'est aussi l'occasion d'inciter les exploitants à s'engager dans une démarche volontaire et vertueuse pour anticiper ces échéances réglementaires.
- **Pour certains parcs anciens, des contraintes techniques** sont parfois avancées comme des freins à la mise en œuvre d'une régulation (ex. dispositif SCADA des éoliennes ne permettant pas la programmation des régulations). Dans ce cas, la perspective d'un renouvellement peut être l'occasion de revoir la situation A défaut de perspective de renouvellement sur le court terme, sur certains parcs, des solutions techniques peuvent parfois être envisagées même si elles sont contraignantes (ex. remplacement du système SCADA). La réduction rapide des impacts générés par les parcs éoliens les plus anciens être une priorité comme le souligne aussi Voigt et al. 2022.
- **Enfin, pour les parcs qui ne sont pas régulés parce que les études ont conclu qu'il n'y avait pas justification à ce qu'ils le soient (ex. mortalité jugée non significative)**, il est recommandé de mettre en place une régulation préventive sous seuil de production. En effet, compte tenu du cumul de biais relatifs aux études, les lacunes de connaissances encore prégnantes concernant l'activité de plein ciel des chauves-souris et l'évolution interannuelle possible des conditions et des enjeux, cette mesure de régulation sous seuil de production garantie à minima que les éoliennes n'aient pas d'impact quand elles ne produisent pas.

Pour faciliter la généralisation de la mesure de régulation à large échelle, d'autres leviers peuvent aussi être envisagés :

Renforcer le cadrage, l'accompagnement et les prescriptions techniques à l'échelle nationale et régionale. En effet pour des études souvent complexes et qui requièrent un certain niveau d'expertise, on constate (volet 1) que l'incitation par des prescriptions techniques s'avère parfois très efficace pour améliorer les pratiques. C'est par exemple grâce à la révision 2018 du Protocole de suivi environnemental des parcs éolien que les études de suivis d'activité en hauteur ont largement progressé (évolution de 23% à 76% après 2018) permettant d'affiner considérablement le processus de prise de décision et de dimensionnement argumenté de la mesure. Ce type d'étude a été imposé par le protocole de suivi environnemental alors qu'elle reste trop peu suggérée dans les différentes versions de guides de l'étude d'impacts sur l'environnement des parcs éoliens. Elle pourrait aussi être imposée pour les études d'impacts. En effet, il est constaté que c'est surtout lorsque la réglementation évolue que les pratiques changent. Et quand ce type de prescription nationale est disponible, il s'agit aussi de veiller à ce qu'il soit respecté

Globalement, le volet 1 montre que la qualité des études (notamment les protocoles de suivis de l'activité et de la mortalité) tend à s'améliorer et à s'homogénéiser progressivement, malgré la disparité initiale des pratiques et des évolutions très variables entre les régions. On peut

rappeler d'ailleurs l'effet positif de certaines régions précurseurs en la matière (où le développement éolien est généralement le plus ancien) et qui peuvent favoriser l'évolution des pratiques par leur expérience, en amont même d'une démarche nationale (ex. durée des suivis, dates de début de suivi des protocoles de suivis de mortalité ou de suivis d'activité en hauteur qui dépassent souvent largement les minimums nationaux). L'expérience de synthèse et d'analyse des rapports d'études et de suivis à l'échelle régionale est donc aussi très importante à valoriser pour améliorer les pratiques nationales. Cependant **pour que cette évolution des pratiques soit réellement engagée à large échelle et de façon réactive, des groupes de travail et réseaux d'acteurs devraient être régulièrement engagés sur ce sujet à l'échelle nationale pour former, partager ces expériences et produire des guides techniques** (ex. grille de lecture de synthèse pour chaque rapport). Cet aspect apparaît d'ailleurs dans les interviews avec les DREALs comme une demande forte, récurrente « *Besoin d'homogénéiser certaines pratiques. Bénéficiaire de grilles de lecture et d'analyses au niveau national. Besoin d'un document national émanant du ministère. Un référentiel d'activité (national ou par rapport aux parcs voisins) serait intéressant. Standardisation sur les unités et référentiels, mais dépendant de chaque système...* ». L'intérêt pour engager des échanges inter-régions sur ce thème est aussi régulièrement soulevé par les interviews. Le programme OPRECh initie cette démarche via une première étape de synthèse, mais ne peut se substituer à des travaux de groupes multipartites, permettant le dialogue et la prise de décisions concertées à l'échelle régionale et nationale

Si la qualité des études s'améliore progressivement au moins en termes de protocoles de suivis de la mortalité ou d'étude de l'activité en hauteur, les besoins d'accompagnements techniques sont encore importants notamment pour ce qui concerne les phases plus délicates de traitement de données, d'interprétation des résultats vers la prise de décision et le dimensionnement de façon argumentée, objective et transparente.

- **Clarifier le vocabulaire technique** est aussi essentiel pour faciliter les échanges et pour progresser vers la recherche de solutions. L'incompréhension sur le sens donné aux termes est un frein régulier à la présentation des résultats et leur compréhension par tout à chacun. C'est par exemple régulièrement le cas pour ce qui est du critère utilisé comme mesure de l'activité acoustique des chauves-souris (cf. chapitre 2.2.2.3.2 page 62). L'utilisation d'un vocabulaire commun est facilitée par les démarches de prescriptions nationales ou régionales.
- **Donner aux services de l'état les moyens de suivre la progression du taux de parcs régulés** aussi bien dans les régions qu'à l'échelle nationale. A ce jour, seules certaines régions ont engagé ce recensement.

Faire prendre conscience que l'efficacité des mesures de régulation n'est pas seulement liée au dimensionnement de la mesure, mais aussi et parfois surtout à sa mise en œuvre effective. Car les **problèmes de dysfonctionnement dans la mise en œuvre de la mesure apparaissent aussi comme un enseignement majeur du volet 1 d'OPRECh**. Plus de la moitié des mesures de régulation engagées seraient affectées par divers problèmes de mise en œuvre (retard de mise en œuvre en début de campagne, dysfonctionnement ponctuels, problèmes d'horodatages fins, etc.). Ces problèmes de mise en œuvre remettent alors en question les tentatives d'optimisation des mesures. Il est donc recommandé de systématiser l'analyse de la bonne mise en œuvre effective de la mesure dans les rapports de suivis d'impacts. Des applications faciles à utiliser sont disponibles pour cela (ex. Probat Inspector).

4.2. Trois grands principes à respecter vers une optimisation efficace des processus de régulation en France

Trois principaux types de manquements ressortent de l'analyse bibliographique (volet1) à l'origine de trois grands principes essentiels à un développement harmonieux de la régulation en France.

4.2.1. Principe de transparence et d'argumentation scientifique

Dans un contexte d'études souvent très « techniques », le manque d'argumentation claire contribue à entretenir un climat de défiance entre les parties (bureau d'étude, porteur de projet, exploitant, services de l'état, association). C'est d'ailleurs lorsque les connaissances et les argumentations manquent que les clivages sont les plus marqués. C'est donc d'autant plus le cas pour le thème des chauves-souris qu'il s'agit d'un taxon difficile à recenser et dont l'état de conservation des populations reste largement méconnu et sujet à caution.

A titre d'exemple, le chapitre 2.2.3.1.5 page 108 témoigne de trop nombreux cas d'incohérences notamment pour la phase d'argumentation sur le constat de l'efficacité d'une mesure de régulation et sur la décision d'engager, d'optimiser (mesure corrective) ou de reconduire la mesure. 16,5% des études ne concluent pas clairement sur l'efficacité ou l'absence d'efficacité de la mesure. Pour celles qui concluent à un succès, 60% d'entre elles le font sans apporter de réelle argumentation, ce qui ne va pas non plus dans le sens d'un processus scientifique, objectif et transparent. Ce manque d'argumentation scientifique est aussi constaté lors des études d'impacts pour retenir ou non une mesure de régulation et justifier de son dimensionnement. Ces manquements sont régulièrement à l'origine de contestations de la part des services de l'état, et donc d'une phase de renégociation suite au dépôt du rapport. Les retours d'interviews des DREALs sont explicites à ce sujet, mentionnant l'existence de cette phase de négociations dans la majorité des cas (75 à 100%). Sans réel socle scientifique, les échanges en viennent à des débats de négociations âpres entre les porteurs de projets et les services de l'état qui prennent progressivement le pas sur les fondements d'une démarche scientifique. **Une présentation détaillée des résultats et des décisions argumentées doivent donc revenir au cœur des échanges entre les parties prenantes pour que la réduction d'impact des parcs éoliens sur les chauves-souris s'appuie sur une démarche scientifique.**

4.2.2. Principe d'humilité pour la qualité des études et la progression des connaissances

Améliorer la qualité des études est aussi essentiel dans un contexte d'expertises techniques parfois complexes. C'est aussi et surtout parce qu'il **faut ne pas oublier que nos connaissances sont encore limitées sur l'écologie de vol des chauves-souris en plein ciel et ses facteurs d'influence qu'il est important d'exploiter toutes les données disponibles.** Le volet 2 d'OPRECh témoigne des limites de modélisation de l'activité des chauves-souris en fonction des conditions climatiques et du lien entre activité et mortalités à l'échelle d'un site. C'est dire que cette démarche est ambitieuse sur une échelle plus large. Sans compter que les études concernant les rapports entre éolien et chauves-souris sont exposées à un cumul de biais. Dans ces conditions, cette humilité sur l'état de nos connaissances et sur les limites des outils et méthodes doit nous permettre de veiller à **éviter ou limiter autant que possible toutes démarche conduisant à simplifier ou échantillonner l'information dans les études** (ex. pression de suivi, échantillonnage d'analyse de données).

Concrètement, c'est la raison pour laquelle il est recommandé de présenter un graphique de chronologie d'activité en hauteur détaillé par nuit et en continu sur toute la période d'activité des chiroptères (sans échantillonnage temporel ou d'analyse des données) pour comprendre les phénologies, les comportements, l'effet des conditions climatiques). Si ce graphique peut présenter une image partielle de la réalité, c'est d'autant plus primordial d'en exploiter en détail l'ensemble des informations disponibles.

C'est aussi la raison pour laquelle il est conseillé **de multiplier les sources d'informations et les critères d'analyse pour prendre des décisions.** D'où l'intérêt par exemple de tenir compte du pourcentage d'activité résiduelle à risque, mais aussi du niveau d'activité résiduelle à risque pour juger de la pertinence d'un pattern de régulation. D'où l'intérêt aussi de juger de l'efficacité d'une mesure de régulation à la fois sur l'évolution d'un taux de mortalité, sur l'évolution de la mortalité brute pondérée et sur les niveaux de mortalités résiduels. D'où l'intérêt aussi de croiser les résultats du suivi d'activité en hauteur et du suivi de mortalité au sol pour faire le constat de l'impact et des conditions de risques.

De façon plus générale, **il est nécessaire d'améliorer les connaissances écologiques sur les différentes espèces de chauves-souris**, non seulement en France métropolitaine mais aussi et surtout outre-mer dont

les lacunes de connaissances sont encore plus prégnantes pour certaines espèces ou territoires. « *Une meilleure connaissance de l'écologie des espèces permettrait à terme de réduire les risques de mortalité avec des démarches ERC plus précises et abouties* ». C'est une demande formulée par la DEAL Guadeloupe au moment des interviews, relayée par un programme d'amélioration des connaissances engagé depuis. Mais cette remarque est encore valable pour la France métropolitaine. Les lacunes de connaissance de l'écologie des espèces et de leur état de conservation sont toujours un frein majeur à l'établissement de mesures de régulation proportionnées et argumentées.

4.2.3. Principe de proportionnalité et de compromis entre l'intérêt des chiroptères et de la production d'énergie

Le principe de proportionnalité rejoint le précédent dans la mesure où les lacunes encore prégnantes des connaissances doivent inciter à **éviter tout préjugé et conclusion hâtive sous prétexte d'un « dire d'expert »**. **Chaque site doit être traité au cas par cas avec la recherche constante du meilleur compromis entre la protection des chauves-souris et la production d'énergie**. Cet objectif commun doit concerner les études, mais aussi les phases de négociations entre les parties prenantes.

Concrètement, cela signifie par exemple que si une mesure de régulation s'avère être surdimensionnée (avec l'argumentation scientifique qui en découle), alors les négociations doivent pouvoir permettre de revoir à la baisse la mesure dans un objectif d'optimisation de la production d'énergie (tout comme elle est revue à la hausse quand elle est sous-dimensionnée).

Ce principe doit par exemple aussi remettre en question les pratiques qui consistent à associer un seuil de vitesse de vent de régulation à la simple présence de telle ou telle espèce en considérant « à dire d'expert » qu'elle est théoriquement capable de voler avec de telles conditions, même si cela n'est pas du tout le cas sur le site en question. Ce qui importe, c'est bien de comprendre au cas par cas comment l'espèce se comporte sur le site pour adapter la mesure en proportion de cette perception locale argumentée. **Il est important que l'étude soit de bonne qualité, qu'elle repose sur des outils et méthodes suffisamment pertinents pour produire un jeu de données représentatif de la situation du site, et que ce soient bien ces données propres au site qui servent au processus de décision et de dimensionnement de la régulation.**

Enfin, ce principe de proportionnalité peut être rappelé de façon plus générale par des retours d'interviews qui témoignent d'« *Enjeux chiroptères souvent mis en dessous des enjeux oiseaux, il faut les mettre au même niveau* ». DREALs et bureaux d'études se sentent aussi concernés par le principe de proportionnalité : « *Absence de mortalité montre que la mesure fonctionne mais ne permet pas de montrer si elle est surdimensionnée* ». « *Aujourd'hui, bridage conservateur. Ce qui est dommage c'est qu'une fois en exploitation, on reste sur le même bridage même si possible de réduire les paramètres. Comment optimiser vers le bas ?* »

Les trois grands principes cités précédemment sont déclinés par la suite des recommandations pour chaque étape du processus de régulation.

4.3. Contraintes, leviers et recommandations concernant pour les différentes phases du processus

4.3.1. Acquisition et traitement des données d'activité en hauteur en continu

Les pratiques de suivi de l'activité en hauteur des chauves-souris progressent dans l'espace (homogénéisation régionale, plus de 70% des études les plus récentes) et avec le temps. C'est l'étape essentielle du processus de régulation pour identifier les conditions à risque. Les principaux leviers d'optimisation possibles sont :

- La **généralisation de suivis acoustiques en hauteur** notamment en phase de développement des projets, avec une position plus incitative des Guide de l'étude d'impact sur l'environnement, pour tous les sites ;
- L'attention portée sur la nécessité **que ces suivis soient réalisés en continu** (sans échantillonnage) **ET à hauteur de rotor** d'éolienne. L'analyse des rapports montre que lorsque seul un de ces deux critères est respecté alors la perception du risque d'impact est fortement réduite, limitant alors la décision d'engager une mesure et limitant aussi la possibilité de dimensionnement objectivement la mesure ;
- **L'incitation au développement de pratiques de suivis acoustiques en continu à la base des machines en complément des suivis acoustiques en hauteur en phase d'exploitation** (proche du sol ou sur le mât à la base de la hauteur du rotor). Le volet 2 montre en effet que ces données d'activité relevées plus proche du sol peuvent permettre de caractériser les conditions de risques de mortalité au moins pour certaines espèces de lisières (pipistrelles). C'est d'autant plus judicieux que la portée d'écholocation de ces espèces (30-40 m, Barataud 2015) est plus faible que la longueur des pales, ce qui ne permet donc pas de mettre en évidence cette activité depuis un enregistreur à ultrasons placé en nacelle quand elles volent bas dans l'entourage du rotor. Sur certains sites, on pourrait d'ailleurs supposer que certaines lisières environnantes puissent jouer le rôle de paravent et donc de refuge d'activité pour des insectes-proies, expliquant indirectement une activité de chiroptères dans l'entourage bas du rotor, même par conditions ventées. Et si la mesure de régulation n'est dimensionnée que sur la base de l'activité mesurée en hauteur, elle n'intégrera donc pas cette problématique limitant ainsi l'efficacité de la mesure. Pour toutes ces raisons, **un suivi en continu à la base des éoliennes est recommandé de façon générale, mais tout particulièrement pour les parcs à grands rotors et en contextes forestiers, bocages denses...**
- **Le choix pertinent des unités de mesure de l'activité.** Les paramétrages des outils acoustiques sont susceptibles d'influer fortement le nombre d'unités acoustiques. C'est pourquoi une activité non pas décomposée par unités de « contacts » ou de « séquences », mais par durée d'activité cumulée (ex. nombre de secondes d'activité de la Pipistrelle commune) pourrait permettre une représentation à la fois plus comparable et plus parlante de la notion de durée d'activité à risque de l'espèce dans ou dans l'entourage du rotor. Concrètement, si plusieurs outils dont les triggers variables détectent la même activité pendant 45s et produisent ainsi un nombre de « contacts » très différent (ex. 45 fichiers de 1s, 9 fichiers de 5s, 56 fichiers de 800 ms...), alors la présentation des résultats sous la forme du cumul de ces fichiers (ici pendant 45s) pour chaque enregistreur permettrait de s'affranchir de l'effet trigger pour une perception cohérente de l'activité entre chaque enregistreur. En réalité, la comparaison des résultats issus de différents enregistreurs reste délicate, car au-delà de cette notion de trigger, de nombreux autres choix de paramétrages interviennent ;
- La **prise de conscience que l'absence de suivi d'activité en hauteur ne permet pas un dimensionnement** proportionné du pattern de régulation. Dans ce cas, il est recommandé que l'exploitation du parc se fasse au moins avec l'intervention d'une mesure préventive (conventionnelle) ;
- Le **développement des référentiels d'activité** par type de matériel acoustique et conditions de mise en œuvre, pour permettre une prise de recul sur les niveaux d'activité mesurés, des comparaisons interannuelles voire des comparaisons inter-sites. Chaque type de matériel devrait disposer de son propre référentiel, avec précision des paramètres de réglage de l'outil. La façon dont être défini ce référentiel doit alors être présentée dans les rapports ;
- La **perception et la présentation dans les rapports des biais et limites** inhérentes aux méthodes de suivis acoustiques, et en particulier des suivis en continu en hauteur. L'activité mesurée n'est jamais qu'une représentation partielle de la situation de vols des chauves-souris dans l'entourage des rotors. D'où l'intérêt d'un recueil très important de données sur le site pour

être en mesure de percevoir par ce cumul de données, la diversité des conditions à risques. D'où l'intérêt aussi, en connaissance de ces limites, de veiller à utiliser des outils et paramétrages acoustiques appropriés pour détecter de la diversité du champ ultrasonore du cortège d'espèces du contexte biogéographique du site étudié ;

- La **présentation des résultats sous la forme d'une synthèse chronologique de l'activité**, idéalement par nuit, par espèces ou groupes d'espèces et avec le référentiel d'activité associé. Ce graphique est au cœur de l'analyse de l'exposition au risque de mortalité des chauves-souris. C'est alors l'occasion d'y rechercher, de caractériser l'intensité d'activité et les périodes d'activité ou d'absence d'activité, les pics d'activité massifs et ponctuels (pipistrelles principalement), la récurrence de passages de transit d'espèces de haut vol et / ou migratrices, l'évolution du cortège d'espèces au fil des saisons, les phénologies, etc. Ce graphique est alors considéré comme l'image de l'activité de référence sur le site et pourra alors servir en phase de dimensionnement de la mesure pour tester de différents scénarios de patterns de régulation sur cette activité de référence. La Figure 107 est exemple d'une présentation type de la chronologie d'activité ;
- Un **croisement et une analyse détaillée de l'effet des différents paramètres climatiques et temporels** (vitesse de vent, température, horaires, périodes, voire précipitations, etc.) sur l'activité chiroptérologique de référence. L'analyse devrait idéalement être décomposée par groupes d'espèces voire par espèces et notamment pour les espèces les plus patrimoniales et sensibles les plus ciblées par la mesure de régulation. De même, il est recommandé de décomposer les principales phénologies saisonnières avec une attention portée sur les activités de fin d'été/automne au vu de la sensibilité généralement plus marquée pour cette période. La Figure 108 est exemple d'une présentation type de corrélation vitesse de vent et activité. La Figure 109 est exemple d'une présentation de l'activité en fonction des horaires nocturnes ;
- **Privilégier des critères d'analyse pertinents, justifiés et variés** (ex. se baser sur des pourcentages d'activité par classes climatiques en parallèle de niveaux d'activité cumulés). L'analyse du pourcentage d'activité des chauves-souris pris en compte ou non pris en compte par le pattern de régulation retenue est en effet largement utilisée dans les pratiques du dimensionnement de la mesure. Ce taux de protection théorique de la mesure sur l'activité de référence est en effet de plus en plus estimé pour justifier du choix du pattern dans les rapports et devient aussi un critère de négociation entre les exploitants et les services de l'état. Les seuils de 80 % voire 90% de protection de l'activité sont ainsi régulièrement avancés comme des objectifs à atteindre mais le même pourcentage d'activité résiduelle restant à risque peut correspondre à des niveaux d'activité et donc des niveaux de risques très variables selon les sites. Par ailleurs, sur les sites à très forte activité, même un fort pourcentage d'activité protégée induit une très importante activité résiduelle non protégée. Inversement, sur un site à très faible activité, l'ensemble de cette activité peut ne pas générer de risque notable. Il est donc **important de ne pas uniquement se baser sur cette notion de pourcentage**. Seul le niveau d'activité résiduel à risque (restant à risque simulé après mise en œuvre de la mesure) devrait permettre de valider ou non la décision de retenir le pattern de régulation ;

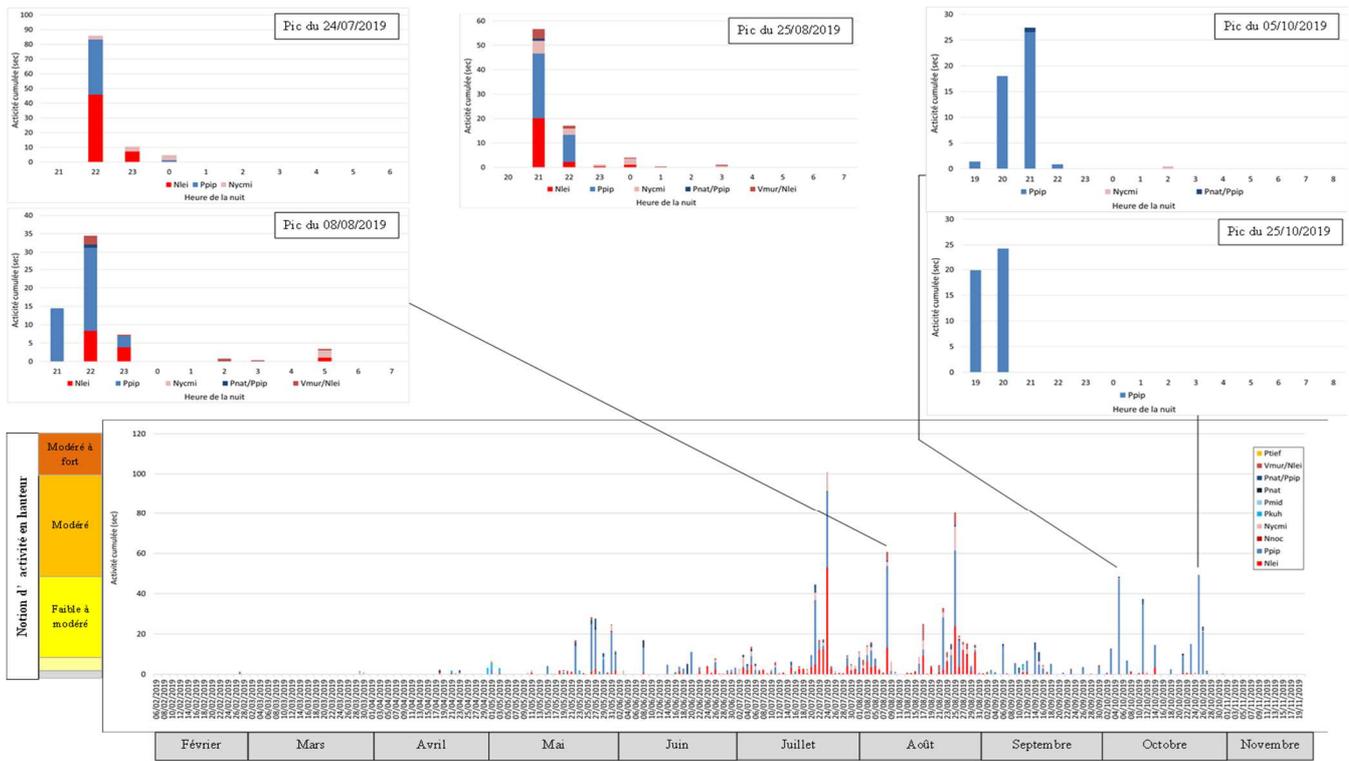


Figure 108 : Exemple de présentation de corrélation inverse entre la vitesse du vent et l'activité cumulée des chauves-souris en hauteur

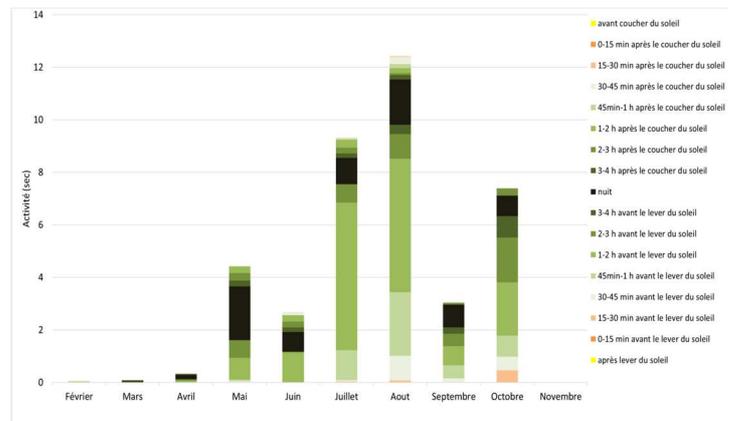
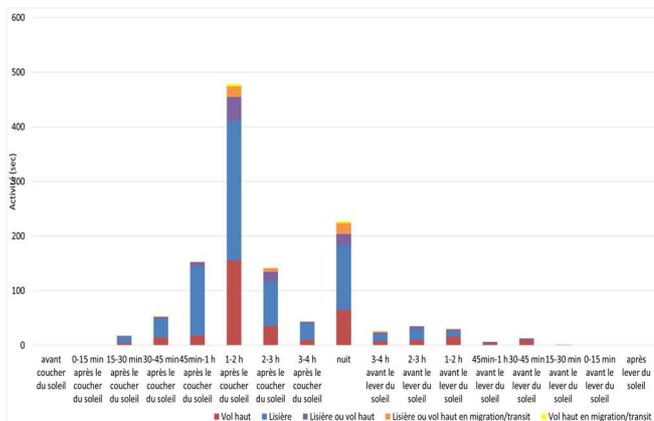
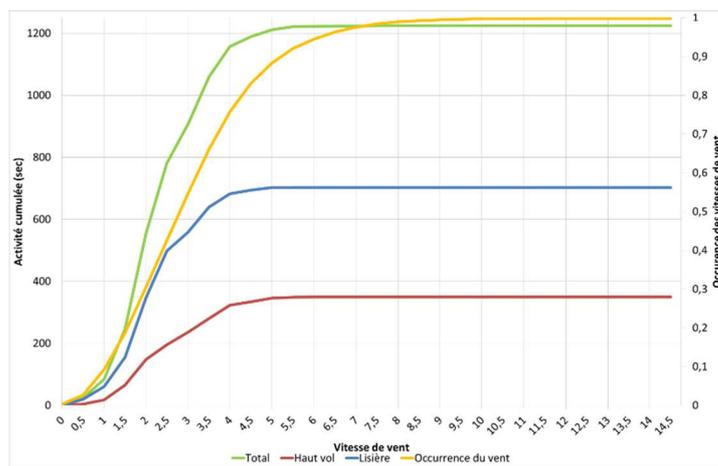


Figure 109 : Exemples de présentations de décompositions horaires de l'activité cumulée des chauves-souris en hauteur

4.3.2. Acquisition et traitement des données du suivi de la mortalité

Le suivi de la mortalité est une étape primordiale du processus de régulation. Elle permet (i) de constater l'impact par mortalité et donc d'évaluer la nécessité de réguler, (ii) d'analyser l'évolution de l'impact sous l'effet de la mesure de régulation et (iii) d'analyser le seuil d'impact résiduel à partir duquel il est jugé « significatif » ou « non significatif » et doit ou non impliquer la mise en œuvre d'une mesure corrective. Le suivi de la mortalité ne peut pas permettre de qualifier précisément les conditions de risques et donc dimensionner la mesure de régulation en proportion. Il peut toutefois y contribuer par croisement avec les données d'activité. Les pratiques concernant le suivi de la mortalité progressent également avec le temps et s'homogénéisent avec un cadre national plus poussé que celui de l'étude d'activité en hauteur. Parmi les principaux leviers d'optimisation possibles, nous recommandons les éléments suivants :

- **Respecter les protocoles en vigueur en termes de pression de suivi** de la mortalité. Le chapitre 3.4.5.2 page 167 montre cependant que l'estimation de la mortalité par les protocoles et formules standardisées aurait tendance à surévaluer la mortalité réelle. La fourchette des résultats est d'autant plus large que la pression de suivi est faible, ce qui limite une réflexion efficace dans le cadre du processus de régulation. **Une pression de suivi à deux visites par semaines sur les périodes les plus à risque** permet une perception plus réaliste de l'impact compte tenu des taux de persistance moyens. **L'application EolPower** peut aider à un dimensionnement pertinent du nombre de passages de recherche de mortalité. Dans le cadre du processus de régulation, la qualité de l'étude de mortalité (pression d'échantillonnage et maîtrise des biais) est d'autant plus importante qu'on ne bénéficie pas d'un suivi d'activité en hauteur. Les choix d'échantillonnage doivent donc idéalement aussi tenir compte de ce fait. Faire entretenir la végétation sous les éoliennes contribue aussi à affiner les résultats en augmentant la détection globale des cadavres.
- **Prendre en compte l'évolution de la végétation** pour pondérer l'analyse des résultats. Ce facteur d'influence semble être insuffisamment pris en compte dans les rapports.
- **Utiliser et présenter les intervalles de confiance** pour présenter les résultats d'estimation de la mortalité. Ils sont encore trop peu exploités. Les applications sont disponibles pour faciliter le développement de ces outils (Shiny, éolApp, GENEST, etc.).
- **Privilégier des critères d'analyse justifiés et variés.** Même si les pratiques tendent à donner de plus en plus d'importance à la mortalité brute (plus ou moins pondérée), 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.** Idéalement, l'analyse doit présenter les deux critères.
- Outre l'approche quantitative, c'est aussi par **une approche qualitative que l'impact doit être qualifié précisément** (espèces concernées, périodes, phénologies, comportements, effet des conditions climatiques, etc.) pour envisager des mesures proportionnées. L'utilisation d'un graphique de **synthèse chronologique de la mortalité** peut aussi permettre par la suite une comparaison avec la chronologie de l'activité en hauteur.
- Améliorer la perception de l'efficacité d'une mesure de régulation en se basant à la fois sur :
 - **L'évolution des résultats de mortalité** en fonction de la mesure (surtout évolution du taux de mortalité, voire des mortalités brutes pondérées). Dans ce cas-là, les méthodes de suivi interannuelles doivent être aussi comparables que possible et l'ensemble des facteurs d'influence doivent être pris en compte (évolution interannuelle des conditions climatiques notamment) ;
 - **Sur le niveau de mortalité résiduel** (taux de mortalité et mortalité brute pondérée) ;
 - Sur une **approche qualitative des mortalités** résiduelles (espèces, enjeux, patrimonialité, périodes, âge, sexe, etc.).
- **Comparer les résultats de mortalité du site avec ceux recueillis à l'échelle locale et régionale** pour estimer les effets cumulatifs et en tenir compte dans le processus de régulation. Sur le plan quantitatif, le taux de mortalité estimé est à privilégier aux mortalités brutes qui sous-estiment la réalité. Ce dernier paramètre est plus à prendre en compte sur le plan qualitatif notamment pour identifier les principales espèces concernées sur une approche locale. Les figures suivantes sont présentées un exemple de ce type d'analyse.

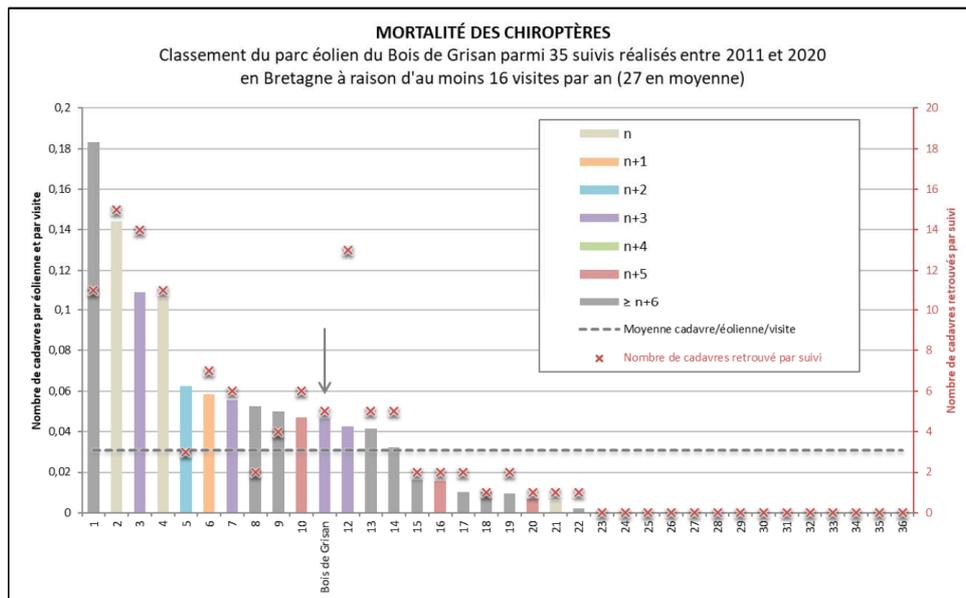


Figure 110 : Exemple de présentation de l'analyse comparative des résultats de mortalité avec ceux des parcs éoliens environnants dans une démarche d'analyse des effets cumulatifs (Ouest'Am)

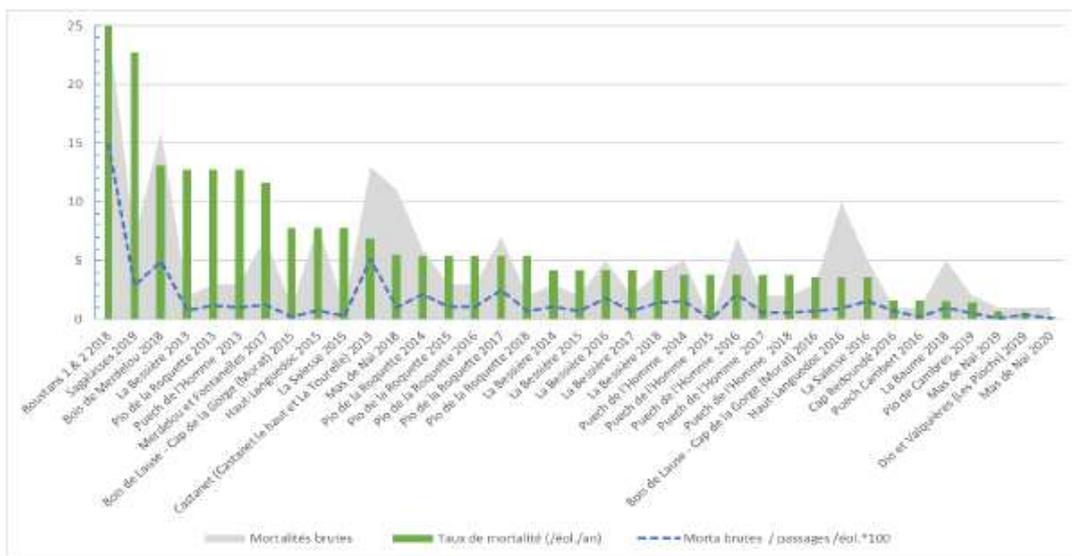


Figure 111 : Exemple de présentation de l'analyse comparative des résultats de mortalité des parcs éoliens situés dans les 30 km du site suivi (Exen)

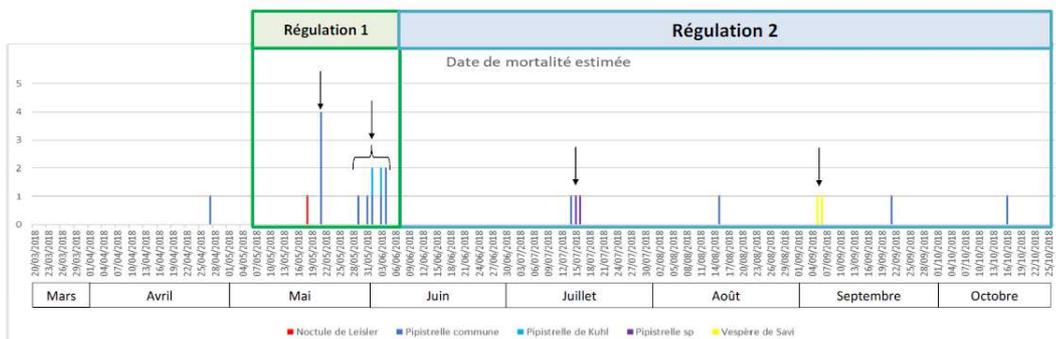


Figure 112 : Exemple de présentation de l'analyse de la mortalité croisée avec les phases de régulation implémentées

4.3.4. Phase de prise de décision, de dimensionnement et de contrôle de la mesure de régulation

Une fois que les résultats des suivis d'activité et de mortalité ont été analysés, juger objectivement de l'impact « significatif » ou « non significatif » du parc éolien ou de l'efficacité des mesures engagées est une phase la plus délicate d'après les retours des représentants des bureaux d'étude interviewés. En effet, ce jugement conditionne la phase de prise de décision quant à la nécessité d'une mesure de régulation, et la phase de dimensionnement d'un pattern proportionné.

Le volet 1 d'OPRECh montre que 16,5 %, des rapports de suivis d'impacts analysés ne concluent pas clairement sur l'efficacité d'une mesure et 60% des perceptions de succès de la mesure se font sans argumentation (« à dire d'expert »). Cela fragilise l'étude et induit une phase de renégociation entre exploitants et services de l'état par la suite.

Pour progresser, ces étapes importantes semblent donc avoir besoin à la fois ;

- D'une argumentation détaillée ;
- D'un cadre méthodologique ;
- Autant que possible de repères comparatifs.

Les contraintes et leviers proposés peuvent être les suivants.

4.3.4.1. Caractère « significatif » ou « non significatif » de l'impact résiduel

Concernant la perception du seuil d'impact « significatif » ou « non significatif », nous avons vu précédemment qu'il n'était pas possible de l'estimer en fonction de son effet sur les populations car la taille et l'état des populations restent mal connus. A défaut, il s'agit à minima de **proposer de grands repères généraux pour aider à définir le niveau d'impact résiduel**. La proposition suivante nécessiterait évidemment une validation nationale par l'ensemble des parties prenantes, via une démarche sociétale et des choix politiques. A défaut, elle est présentée ici à titre d'exemple. Elle repose sur trois approches.

Concernant l'approche quantitative, le taux de mortalité résiduel après mesure reste à nouveau le critère d'analyse le plus fiable. L'Allemagne a fait le choix d'un objectif par défaut et par convention de ne pas dépasser deux mortalités de chauves-souris par éolienne et par an (modèle Renebat) (Behr et al. 2017). Ce seuil théorique, déconnecté de la question de la viabilité des populations, apparaît comme un niveau très faible, difficilement atteignable en pratique, et ce même pour des parcs suivis qui génèrent très peu de mortalités brutes. Car, plus le nombre de mortalités brutes est faible et moins l'estimation du taux de mortalité est précise. En effet, si aucune mortalité brute n'est relevée sur le parc (ce qui n'exclue pas l'absence de mortalité), le taux de mortalité ne peut être calculé. Dès la première mortalité relevée, le taux de mortalité estimé peut-être important compte tenu des biais d'échantillonnage à prendre en compte dans les calculs. Autrement dit, seules des études à forte pression d'échantillonnage et à fort taux de persistance peuvent éventuellement permettre d'aboutir à un taux de mortalité inférieur à 2 chauves-souris/éolienne/an à partir d'une seule mortalité brute. A moins bien sûr que le suivi soit de moindre qualité d'échantillonnage et qu'aucune mortalité brute ne soit relevée pour cette raison. Finalement, au-delà de la déconnection de la notion de seuils de viabilité des populations, le fait de définir des seuils théoriques de taux de mortalité est relatif, tout comme le taux de mortalité est aussi une perception approximative de la mortalité réelle (cf. chapitre 3.4.5 page 165). Toutefois, sur la base de ces éléments et des retours des pratiques, on pourrait envisager une classification telle que suivante, dont les seuils proposés comme base de réflexion devraient idéalement être redéfinis ou validés par une démarche concertée au niveau national :

- < X mortalités /éolienne/an (*proposé 2*) : niveau très faible, non significatif ;
- < Y mortalités/ éolienne/ an (*proposé 5*) : niveau faible, significativité à pondérer par une analyse qualitative fine ;
- Entre X et Y mortalités/éolienne/an (*à définir*) : niveau modéré, significativité à pondérer par une analyse qualitative fine ;
- > Y mortalités/éoliennes/an (*à définir*) : niveau fort, significatif.

L'approche qualitative doit alors arriver en complément de l'approche quantitative. Concrètement, à défaut d'évaluation de l'effet sur les populations, le caractère significatif ou non significatif d'un faible nombre de mortalités doit aussi dépendre du caractère plus ou moins patrimonial et sensible des espèces

concernées, voire de leur statut biologique (ex. femelles gestantes), des 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** (ex. groupe des noctules, Pipistrelle de Nathusius, Sérotine bicolore, Minioptère de Schreibers...). Là encore, on pourrait envisager que des seuils objectifs de mortalités brutes par espèces soient retenus par une démarche concertée pour pondérer l'approche quantitative, à l'échelle nationale, régionale ou à l'échelle du parc.

Enfin, les conclusions doivent être aussi **pondérées autant que possible par les résultats de l'activité**. Vu les biais des suivis de la mortalité, les analyses du suivi d'activité permettent aussi une prise de recul pour rassurer sur la prise de décision selon la cohérence des résultats (ex. au vu du référentiel d'activité ou de l'évolution interannuelle de l'activité entre deux campagnes de mesures).

4.3.4.2. Evaluation de l'efficacité ou de l'échec de la mesure

Concernant l'analyse de l'efficacité d'une mesure de régulation, il est aussi important de proposer des repères pour juger d'un succès ou d'un échec de la mesure et faire le choix d'une reconduite ou d'une évolution de la mesure. Au-delà de la précision du caractère « significatif » ou « non significatif » de l'impact résiduel après mesure qui reste essentiel à préciser, la notion d'efficacité ou d'échec, il est recommandé que la mesure soit appréciée au regard des seuils d'impacts objectifs définis précédemment (quantitatifs et qualitatifs) et de l'évolution des résultats entre avant et après mise en œuvre de la mesure. Là encore, la classification suivante n'est qu'une ébauche de proposition :

- Evolution positive du taux de mortalité (malgré la diminution de la mortalité brute) = **échec** ;
- Diminution du taux de mortalité mais faible augmentation des mortalités brutes = **efficacité partielle** selon la nature des mortalités brutes en question (ex. espèce hautement patrimoniale et sensible ?) et par le taux de mortalité résiduel ;
- Diminution des taux de mortalités et des mortalités brutes pondérées, taux de mortalité résiduel faible à très faible, absence d'espèce phare de haut-vol patrimoniale et sensible = **succès**.

La figure suivante (Figure 114) propose une base de réflexion pour l'interprétation des résultats pour plusieurs types de situations.

Critères quantitatifs			Critère qualitatif	Interprétations	
Evolution du taux de mortalité	Taux de mortalité résiduel (cf. 4.3.4.1)	Evolution des mortalités brutes	Mortalités d'espèces patrimoniales		
	-	-	-		Echec -> mesure à revoir globalement
	Modéré à Fort		Notable		Echec partiel -> mesure à revoir globalement
	Modéré à Fort		Non notable		Echec partiel -> mesure à revoir globalement
	Faible		Notable		Succès partiel -> mesure à revoir en ciblant les espèces patrimoniales
	Faible		Non notable		Succès -> mesure à reconduire en l'état
	Très faible		Non notable	Succès -> mesure à reconduire en l'état	

Figure 114 : Proposition d'aide au mode d'évaluation de l'efficacité ou de l'échec de la mesure pour différentes situations

En plus des éléments précédents, l'analyse comparative avec l'analyse de l'activité des chauves-souris est particulièrement importante à prendre en compte.

Concrètement, dans l'hypothèse d'une diminution constatée de la mortalité entre avant et après la mesure, il est recommandé de **vérifier si cette évolution n'est pas aussi liée à une forte diminution de l'activité** entre les deux situations. Le cas échéant, il s'agirait de pondérer les résultats et de ne pas juger trop hâtivement d'un franc succès si l'activité a fortement diminué.

Il s'agit aussi de **vérifier si les périodes de mortalités et de suivis de la mortalité sont cohérentes avec les périodes d'activité** et en tenir compte pour faire le choix ou valider les plages d'activation pertinentes de la mesure. L'attention porte tout particulièrement sur les phases début et de fin de campagne d'activité qui sont soumises aux plus fortes variabilités annuelles.

4.3.4.3. Prise en compte des problèmes de mise en œuvre effective de la mesure

L'analyse de l'efficacité d'une mesure de régulation ne doit pas se faire non plus sans rechercher et **tenir compte d'éventuels problèmes de mise en œuvre effective** de la mesure au préalable. L'analyse bibliographique d'OPRECh (volet 1) montre que seuls ¼ des rapports évoquent ce biais pourtant majeur pour optimiser la mesure, alors que la moitié des parcs serait concernés.

Ces **problèmes de mise en œuvre effective de la mesure de régulation sont importants, largement sous-évalués dans les études** et donc probablement aussi par les exploitants et l'administration. Ils peuvent surtout induire une surexposition des chauves-souris aux conditions de risques, et donc un risque de non-conformité d'exploitation pour l'exploitant. Mais il se peut aussi de cette mauvaise mise en œuvre soit plus conservatrice que prévue, et dans ce cas-là, elle peut aussi éventuellement générer plus de perte de production d'énergie que ce qu'elle aurait dû.

Enfin ils induisent aussi des erreurs évidentes de perception de l'efficacité quantitative ou qualitative de la mesure de régulation. Et à ce titre, ils **limitent toute possibilité d'optimisation de 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.**

Concrètement, il s'agit de récupérer les données historiques de fonctionnement des éoliennes auprès de l'exploitant et de vérifier que le pattern de régulation censé avoir été implémenté l'a bien été et que les éoliennes ont donc bien été mises en drapeaux pour les conditions à risques définies par ce pattern. Ce type d'analyse peut se faire par tableurs (notamment via tableaux croisés dynamiques), mais aussi via l'utilisation d'applications développées à cet effet (ex. Probat Inspector, cf. Annexe 12).

4.3.4.4. Modes de régulation à favoriser selon les situations

➤ Favoriser le croisement des résultats de plusieurs méthodes de dimensionnement

Considérant les biais techniques et méthodologiques inhérents aux études chiroptérologiques en éolien, et considérant la diversité des situations des sites, des compétences et expériences des chiroptérologues, il est pertinent d'exploiter en parallèle plusieurs méthodes pour analyser les risques et dimensionner les patterns de régulation. Cette approche permet de limiter les risques d'une mauvaise interprétation des données et donc de renforcer la pertinence du conseil. Concrètement, si le mode de régulation prédictif basé sur une approche comportementale est utilisé (méthode largement présentée précédemment) alors l'utilisation du modèle prédictif standardisé Renebat pourrait aussi être favorisée en parallèle pour vérifier la cohérence des résultats. C'est ce qui a été proposé sur la base du jeu de données du volet 2 d'OPRECh (cf. page 3.4.4.2.3 page 163 à titre d'exemple). Dans ce cas, le mode de régulation prédictif de type Renebat apporte la sécurité sur l'approche quantitative de la maîtrise de l'impact et le mode prédictif basé sur l'approche comportementale fine permet d'affiner qualitativement la mesure.

➤ Adapter le mode de régulation au type de données sources disponibles

Par ailleurs, il s'agit d'adapter au mieux les modes de régulations aux données de suivis disponibles car des incohérences ont pu être notées dans les pratiques (volet 1). C'est notamment le cas de mode prédictifs retenus (patterns de régulation basés sur une série de seuils climatiques et temporel), alors que l'analyse ne s'appuie pas sur un suivi d'activité en hauteur, le seul moyen qui puisse permettre de définir les conditions à risque de façon objective.

➤ Mode de régulation prédictif

Avec la progression des suivis en hauteurs, le **mode de régulation prédictif** peut être retenu de façon de plus en plus pertinente. Il est fortement prédominant aujourd'hui et paraît le plus en adéquation avec les grands principes de proportionnalité, d'humilité et de qualité et d'argumentation scientifique des études. Lorsque ce mode de régulation est basé sur une analyse détaillée des modalités d'utilisation du site par les espèces (comportements, saisonnalité, temporalité, conditions climatiques, phénomènes d'aéro-écologie...), il contribue à améliorer les connaissances et à les faire partager ces connaissances, et réduire ainsi la portée subjective du « à dire d'expert ». La subjectivité d'analyse n'est toutefois pas complètement exclue, mais l'analyse est au moins argumentée sur la base de données propres au site en question.

Les modes prédictifs basés sur une modélisation préalable standardisée de l'activité des chauves-souris (ex. Renebat) présentent l'avantage d'une standardisation globale des pratiques, ce qui limite les dérives d'analyse et d'interprétation individuelles. Néanmoins, leur efficacité est dépendante des limites du principe d'une modélisation efficace pour tous les sites alors que même à l'échelle d'un site, les possibilités de modélisation restent relatives (cf. volet 2). Ils peuvent par ailleurs aussi bloquer la progression des connaissances au stade du modèle retenu s'ils ne sont pas régulièrement mis à jour au fil de l'amélioration des connaissances et si l'analyste se contente de faire tourner l'application et de transmettre la prescription de régulation sans prendre le temps d'une interprétation qualitative de la situation du site, des espèces et de leur patrimonialité/sensibilité (cf. intérêts de l'approche comportementale sur l'approche standardisée au chapitre 3.4.4 page 158). Il s'agirait donc de faire en sorte que l'utilisation standardisée de modèles prédéfinis soit privilégiée plus comme « garde-fou » ou moyen de vérification du conseil formulé via une approche plus classique. Autrement dit, en mode de régulation prédictif, l'utilisation combinée d'une approche comportementale fine et d'un modèle standardisé semble une solution pertinente. L'utilisation régulière des deux méthodes en parallèle devrait permettre de faire progresser l'ensemble des acteurs

➤ Mode de régulation préventif conventionnel

A propos du mode de régulation préventif conventionnel, les seuils régulièrement utilisés sont 6 m/s et 10°C. Ces seuils semblent être globalement efficaces pour une majorité de situations (cf. résultats des volets 1 et 2 pour ces seuils). Cependant ils ne garantissent pas une efficacité pour chaque situation. Ceci expose quand même les chauves-souris et l'exploitant à un risque mal maîtrisé et non proportionné. Ce mode de régulation est donc à privilégier en première année d'exploitation d'un parc lorsque aucun suivi d'activité en hauteur n'est disponible à l'état initial. Pour retrouver ensuite une approche proportionnée de la mesure, il s'agit de laisser possible l'opportunité de revoir à la baisse ce pattern si le suivi des premières années montre de façon argumentée que c'est justifié aussi bien pour la maîtrise des mortalités de chauves-souris que pour la production d'énergie.

➤ Mode de régulation préventif sous seuil de production

Le mode de régulation sous seuil de production est à privilégier ;

- Pour les parcs pour lesquels les suivis n'ont pas justifié la mise en œuvre d'une mesure ;
- Pour les périodes d'activité des chauves-souris non couvertes par un autre type de régulation.

➤ Mode de régulation dynamique

Le mode de régulation dynamique (en temps réel) a été très peu présenté dans ce rapport, faute de retours d'expérience. Si l'intérêt théorique de ce mode de régulation est évident dans une démarche de proportionnalité de la mesure (calquée sur l'activité mesurée en temps réel et non plus sur des conditions de risques prédéfinis), elle pose aussi diverses contraintes vis-à-vis des grands principes.

- Pour répondre au principe de transparence et d'argumentation et lutter contre le subjectif « à dire d'expert », la définition de l'algorithme de régulation de chaque système, basé sur la détection en temps réel d'une situation à risque devrait idéalement être présentée et argumentée pour justifier de sa pertinence sur la situation du site. Cet algorithme devrait d'ailleurs idéalement être adapté au cas par cas en fonction de l'activité mesurée à l'état initial. Compte tenu de la diversité des comportements de vols et donc de détection acoustique possible, le choix de l'algorithme peut éventuellement favoriser la protection de certaines espèces ou comportements. Il convient donc de rendre compte sur la pertinence de ces choix.
- Dans la mesure où le mode de régulation dynamique est censé débrayer un mode de régulation prédictif lorsqu'il n'y a pas de chauves-souris, il s'agit de s'assurer que cette prise de risque s'appuie bien sur une mesure pertinente de l'activité en temps réel. L'efficacité des outils acoustiques (sensibilités, opérationnalité...) est donc une condition primordiale à ce niveau. Elle est notamment bien plus importante dans le cadre d'un mode prédictif où les conditions de risques sont définies sur la base d'une grande quantité de données d'activité, et pour lesquels les biais des outils acoustiques peuvent être compensés par le volume des données. Or, à ce jour, et à notre connaissance, tous les outils de suivi acoustiques ne peuvent donner qu'une image partielle et/ou imparfait de l'activité de vol dans la zone du rotor et son entourage. Ces limites vont encore se renforcer avec l'augmentation progressive de la taille des éoliennes et donc du rotor.
- Les premiers retours d'efficacité de ce type d'outil relevés dans la littérature spécialisée (Rabie et al. 2022) témoignent d'une baisse significative de la mortalité, comparé à une situation sans régulation, voire même à une régulation prédictive à 4,5 m/s. Mais elle témoigne aussi une **perte de production de 280% supérieure à celle de la régulation prédictive**. Cela souligne à nouveau l'importance de la pertinence de l'outil de détection acoustique et du choix de l'algorithme de détection d'une intrusion à risque.

4.3.4.5. Quelques repères sur pour aider au choix des paramètres et des seuils du pattern à retenir

Pour l'ensemble des paramètres, les synthèses qui suivent proposent une vision générale moyenne à n'utiliser que comme repères dans la phase de réflexion du pattern de régulation. Car les choix doivent de paramètres et de seuils restent à définir au cas par cas selon les sites, les particularités comportementales locales du cortège d'espèces, l'évolution des phénologies saisonnières, les facteurs environnementaux, les milieux et habitats, le gabarit des éoliennes, etc.

➤ Vitesse de vent

La vitesse de vent est le principal paramètre à prendre en compte pour définir le pattern des conditions à risques. Les vitesses de **5-6 m/s montrent une efficacité de réduction de la mortalité notable et plutôt homogène selon les sites**. Des vitesses plus faibles peuvent aussi être efficaces sur certains sites. Concrètement, si les phénomènes de pics d'activité de pipistrelles en hauteur sont bien liés à des essaimages d'insectes (Foo et al. 2017, de Jong et al. 2021, Richardson et al. 2021), alors il est logique que ces phénomènes s'expriment par des vents faibles (et forte températures) (Long et al. 2010). Dans ces cas la régulation à faible vitesse de vent sera efficace pour protéger ces phénomènes. Cependant si d'autres types de comportements ou causes d'attractivité (Cryan et al. 2008, 2009, 2014, De Jong et al. 2021, Guest et al. 2022) et d'espèces moins dépendants des conditions de vents sont aussi concernés (ex. activité sociale, transits migratoires de noctules, etc.), alors cette régulation sera insuffisante. Il est donc possible d'adapter ces seuils aux principales périodes phénologies des espèces dès lors qu'elles sont connues et récurrentes sur chaque site. L'expérience des suivis en hauteur en continu à large échelle permettent de montrer que les vitesses de vent très élevées (8-9 m/s) sont généralement très peu exploitées par les chauves-souris, y compris pour les espèces de haut-vol. La plupart des espèces sont toutefois capables de voler pour ces vitesses de vent et même pour des seuils plus élevés (ex. même la Pipistrelle commune est ponctuellement détectée en plein ciel jusqu'à plus de 10 m/s). Ces situations sont exceptionnelles et ne représentent en général pas des activités récurrentes et représentatives sur un site. Ces vitesses de vent ne devraient donc être exploitées que très rarement dans le cadre d'une mesure de régulation, **dans le respect du principe de proportionnalité**, et uniquement pour les sites où l'activité des espèces est identifiée comme récurrente pour ces conditions de vent.

➤ Température

La température doit aussi être exploitée au cas par cas et de façon argumentée dans le processus de dimensionnement. Les pratiques (volet 1) et les courbes de réponse obtenues dans notre étude (volet 2) valident la **pertinence d'un seuil de 10°C avec une forte augmentation de l'activité entre 10 et 25°C** en général, même si certaines espèces, et notamment certaines patrimoniales, peuvent bien sûr aussi voler par des températures plus faibles ou plus fortes.

➤ Horaires d'activation

Horaires d'activation : il est conseillé de **retenir des horaires qui concernent l'intégralité de la nuit en général**. L'expérience montre en effet que même si en moyenne l'activité est souvent plus marquée en première partie de nuit, les heures des pics d'activités parfois massifs sont bien plus étalées dans la nuit. Là encore, il convient d'adapter la mesure à la réalité mesurée sur le site. L'intérêt de préconiser une mesure sur toute la nuit facilite aussi l'analyse de l'efficacité de la mesure. En effet si une mortalité intervient en période de régulation, il est difficile de déterminer si elle est intervenue alors que la régulation était effective (et donc inefficace) ou si elle est intervenue en dehors des horaires d'activation de la mesure.

➤ Précipitations

Précipitations : les volets 1 et 2 d'OPRECh montrent que ce paramètre est complexe à prendre en compte. Les interviews des DREALs font ressortir ce problème « *Comment définir le bridage « en l'absence de précipitation » ?* Il est encore nécessaire d'améliorer les connaissances pour définir réellement les conditions à risques et les paramètres et seuils les plus justifiés. Ce pourrait être réalisé à l'échelle des parcs et projets utilisant des capteurs de pluviométrie et d'hygrométrie dans le cadre des études et suivis et de comparer ainsi l'activité des chauves-souris avec l'évolution de ces paramètres. Ce pourrait être aussi engagé par une approche plus générale et expérimentale (programme de recherche) pour aider à affiner le conseil à plus large échelle.

➤ Choix des éoliennes

Concernant le choix des éoliennes pour lesquelles préconiser la mesure de régulation, il est délicat de préconiser une régulation différenciée par éoliennes au sein d'un parc. Si c'est le cas, ce doit être justifié par une perception fine de différences de risques par éoliennes. Ce peut éventuellement être le cas pour des éoliennes qui n'ont pas le même contexte environnant et notamment pour celles qui présentent un risque vis-à-vis des espèces de lisières selon les distances aux lisières. Ce pourrait être aussi justifié pour des éoliennes qui n'auraient pas le même gabarit au sein du parc. Cependant pour la problématique des espèces à haut vol ou lors de prises d'altitudes des espèces de lisières, il est difficile de limiter la perception du risque à l'échelle d'une éolienne. A défaut, on considère en général la distribution d'activité des chauves-souris de façon implicite comme uniforme en plein ciel (Voigt et al. 2021). **La mesure de régulation ciblée vers ces espèces doit donc être plutôt uniforme entre les éoliennes.**

4.3.4.6. Anticipation de mise en œuvre de la mesure

La réglementation en vigueur cadre la fréquence des suivis d'impacts des parcs éoliens et le délai de mise en œuvre de ces suivis après installation du parc. Comme la mesure de régulation est par ailleurs conditionnée à l'appréciation du caractère « significatif » ou « non significatif » de l'impact, alors la réactivité de sa mise en œuvre est aussi indirectement liée à ce cadre réglementaire.

Pour autant, comme cette mise en œuvre nécessite une première phase d'analyse des impacts (première campagne de suivi), il arrive parfois qu'une surmortalité de chauves-souris soit constatée dès cette première campagne de suivi où le parc n'est pas régulé. Dans ce cas, il est fortement préconisé **de ne pas attendre la fin de la campagne de suivi pour initier une première mesure préventive de régulation en cours d'année.** Non seulement cela permet de limiter les surmortalités, mais cela peut aussi permettre de gagner du temps en produisant des premiers résultats sur l'effet de la mesure préventive. S'il valide cette anticipation, l'exploitant s'engage alors dans une démarche volontariste vertueuse qui peut contribuer aussi à faciliter les rapports avec les services de l'état par la suite. Ce type de démarche requiert une veille et des échanges réguliers entre l'exploitant et son prestataire en cours de suivi. Le prestataire doit alors être en mesure d'identifier d'éventuelles surmortalités qui témoigneraient d'un défaut supposé d'efficacité de la mesure pour en informer l'exploitant de façon réactive.

4.3.4.7. Tester différents scénarios de régulation pour argumenter la pertinence du choix retenu

La phase de simulation pour tester les mesures envisagées sur la chronologie d'activité de référence (démarche par tâtonnement) est particulièrement intéressante pour faciliter ce choix et le justifier. Elle permet en effet d'anticiper les seuils à partir desquels la mesure est efficace mais aussi les seuils à partir desquels ils ne sont plus efficaces. Autrement dit, cela permet de mettre en évidence les conditions d'un surdimensionnement de la mesure. Elle est toutefois très rarement engagée dans les rapports.

Pour la mettre en œuvre, il s'agit d'estimer le niveau d'activité résiduelle restant à risque après mise en œuvre de la mesure (niveau d'activité, ex. nombre de secondes d'activité cumulées restant à risque) mais aussi de qualifier finement cette activité résiduelle à risques (ex. activité résiduelle concernant principalement des pipistrelles ou bien des passages de transits d'espèces de haut-vol, etc.).

Concrètement, des outils de tableaux et tableaux croisés dynamiques ou autre programme codé sous R peuvent permettre de réaliser ces simulations en faisant varier les patterns. Les paramètres du pattern doivent alors être testés de façon combinée (influence combinée des paramètres) de façon interspécifique, par groupes d'espèces voire par espèces pour les plus patrimoniales et sensibles.

Les graphiques suivants sont des exemples de présentation de ce type de démarche

Sans régulation		Pattern de régulation retenu		
Espèce	Activité persistant à risque	Espèce	Activité persistant à risque en plein ciel	Réduction du risque en plein ciel
Nlei	611,7	Nlei	18,3	97%
Nlei/Nnoc	4,9	Nlei/Nnoc	0,7	85%
Nnoc	30,7	Nnoc	2,2	93%
Nyctaloid	67,6	Nyctaloid	7,9	88%
Pkuh	73,5	Pkuh		100%
Ppip	62,2	Ppip	2,2	96%
Total	850,5	Total	34,3	96%

Figure 115 : Exemple de tableau présentant les niveaux d'activité comparés entre la situation initiale sans régulation et l'activité résiduelle à risque après mesure

Exemple : Niveaux d'activité comparés (en secondes d'activité) entre la situation initiale (sans régulation) et l'activité à risque résiduelle en plein ciel après régulation

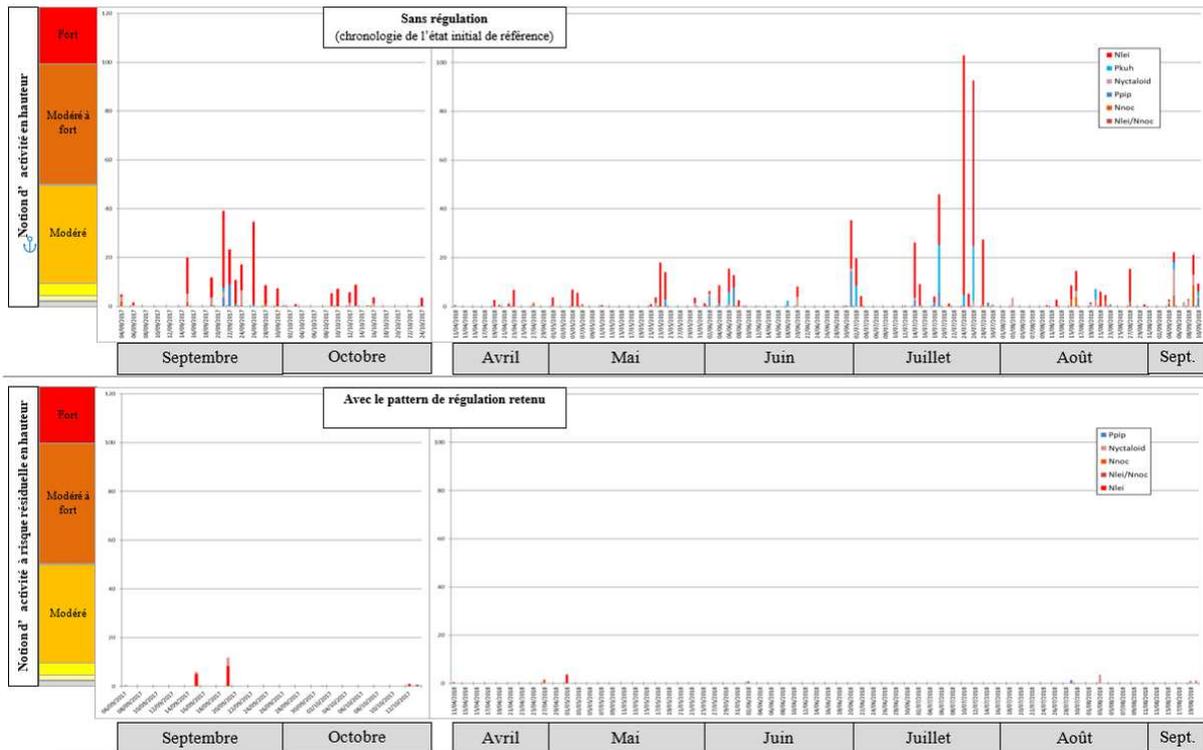


Figure 116 : Exemple de présentation d'une simulation de l'effet d'une mesure de régulation sur l'activité de référence

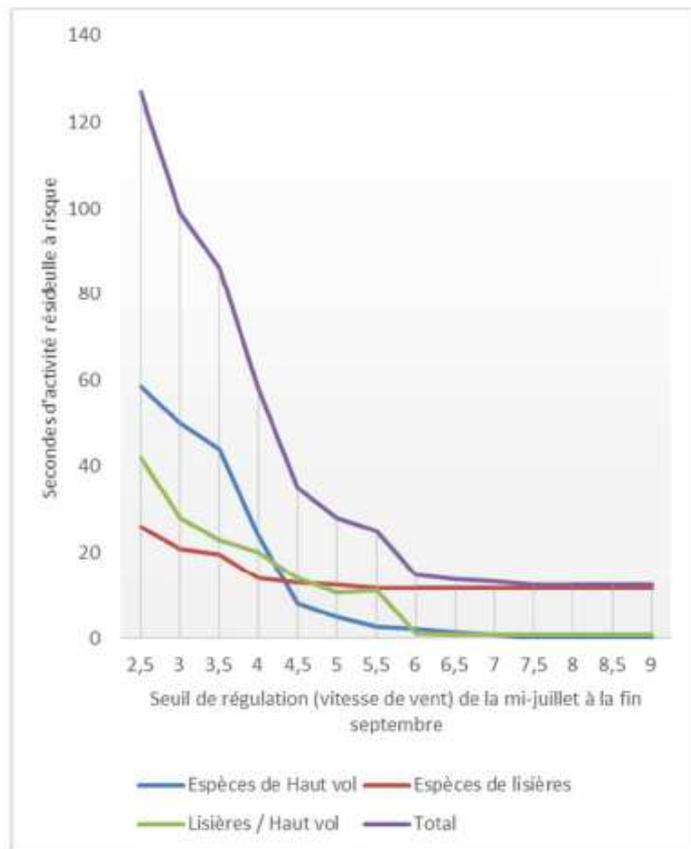


Figure 117 : Exemple de simulations de courbes de réduction de l'activité résiduelle à risque selon l'évolution du pattern de régulation

4.3.4.8. Produire un document conclusif et une synthèse standardisée des résultats

Produire un document conclusif et argumenté concernant la mesure de régulation à mettre en œuvre ou à réviser est un objectif clair du cadre du Protocole de suivi environnemental. Cependant de nombreuses personnes interviewées des DREALs, bureaux d'étude et exploitants se rejoignent sur l'intérêt de **bénéficiaire, en fin de rapport, d'une fiche mémento de synthèse qui permet de juger rapidement de la qualité de l'étude et présente les éléments de méthode et de résultats** pour une étude de qualité en accord avec les prescriptions nationales :

- Contexte historique : études passées, principaux enjeux
- Le suivi en hauteur -> méthodes de suivi, conditions de risques
- Le suivi de la mortalité -> méthodes de suivi, niveau d'impact et intervalles de confiance
- La régulation qui a été testée dans le cadre d'un suivi -> critères d'analyses, valeurs,
- La mise en œuvre de la mesure -> mode de régulation, pattern, critères d'analyses, valeurs,
- Le bilan conclusif sur l'impact « significatif » ou non -> critères d'analyses, valeurs,
- Le bilan conclusif sur le besoin ou non d'optimisation de la mesure-> critères d'analyses, valeurs,
- Tableau de synthèse de la mesure qui sera mise en vigueur, mode et pattern.
- Autres... (respect des principaux principes.).

L'intérêt est de permettre une analyse rapide des dossiers, et de procéder à des comparaisons plus faciles que s'il s'agit de rechercher les informations dans des formes de rapports différentes. Ces possibilités de comparaisons ont un intérêt aussi bien à l'échelle du parc qu'à une plus large échelle.

4.4. Autres contraintes et leviers (partage et valorisation des connaissances)

Lors du recensement national effectué dans le cadre d'OPRECh en 2020, une des principales contraintes rencontrées a été la difficulté d'accès aux documents réglementaires relatifs aux parcs éoliens (arrêtés préfectoraux ou rapports de suivis d'impact). Toutes les banques de données en ligne à disposition du public ont pourtant été exploitées mais il s'est avéré que les documents recherchés étaient souvent indisponibles. C'est bien grâce à l'exploitation de différentes sources de données pour recouper les informations disponibles pour chaque parc qu'il a été possible de constituer une base de données cohérente vis-à-vis des thématiques environnementales pour les parcs éoliens terrestres dans le cadre d'OPRECh. Rappelons toutefois que même pour un effort de collecte s'étalant sur plusieurs années avec de multiples requêtes à toutes les administrations (départementales et régionales), il reste encore près de 40 % des parcs éoliens construits à l'heure actuelle pour lesquels aucun document n'a pu être collecté.

Nous remercions encore une fois toutes les administrations qui ont répondu favorablement à nos requêtes de consultation de documents publics. Concernant ces requêtes, il est intéressant de rappeler que la loi encadre l'accès aux documents administratifs et la réutilisation des documents publics (Articles L300-1 à L351-1 du code des relations entre le public et l'administration). Plus précisément, concernant la diffusion des documents administratifs auprès du public, l'article L312-1 mentionne que « *Les administrations [...] peuvent rendre publics les documents administratifs qu'elles produisent ou reçoivent* ». L'article L.312-1-1 précise notamment que « *les administrations publient en ligne [...] les données, mises à jour de façon régulière, dont la publication présente un intérêt économique, social, sanitaire ou environnemental.* ». Les arrêtés préfectoraux relatifs aux mesures environnementales mises en place sur les parcs éoliens, ou encore les rapports de suivis d'impact des parcs éoliens en exploitation rentrent donc pleinement dans le cadre de l'article L.312-1-1. Or, plusieurs administrations n'ont soit pas répondu aux requêtes de consultation ou ont refusé de fournir l'accès à certains documents notamment les rapports de suivi d'impact, attestant que ces documents appartenaient aux entreprises exploitant le parc éolien. Pourtant, dès lors que le document a été traité par l'Administration, il semble conforme au code des relations entre le public et l'administration que celui-ci soit mis à disposition du public.

Globalement, une homogénéisation des réponses de l'administration vis à vis des requêtes de consultation des documents publics semble nécessaire à l'échelle nationale. A l'heure actuelle, au niveau régional, l'ensemble des DREALs de France présente un site internet, un portail d'information en ligne et une cartographie interactive. Pour autant, seule une petite part d'entre elles mettent à disposition du public tous les documents qui se réfèrent à un parc éolien, à l'image de la région Occitanie qui rend possible le téléchargement des arrêtés et rapports de bureaux d'études sur sa plateforme en ligne picto-occitanie.fr. Il serait intéressant que cette pratique soit généralisée à l'ensemble des DREALs du territoire national.

Tous ces documents, et notamment les suivis post-implantation des parcs éoliens permettent non seulement d'évaluer l'impact cumulés des parcs éoliens à un endroit donné, mais aussi d'adopter une vision générale des mesures mises en œuvre pour éviter, réduire et compenser les impacts sur la biodiversité. C'est en considérant l'ensemble de ces mesures qu'il sera possible de mieux caractériser l'impact de l'éolien sur les populations locales d'espèces sensibles, et d'adopter une vision éclairée des efforts à mettre en œuvre dans une région donnée pour assurer le maintien des populations d'espèces protégées dans un état de conservation favorable.

BIBLIOGRAPHIE

- Adams EM, Gulka J, Williams KA (2021) A review of the effectiveness of operational curtailment for reducing bat fatalities at terrestrial wind farms in North America. *PloS One* 16:e0256382. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256382>
- Agudelo, M. Sofía, Todd J. Mabee, Rosa Palmer, et Ryan Anderson. 2021. « Post-construction bird and bat fatality monitoring studies at wind energy projects in Latin America: A summary and review ». *Heliyon* 7 (6): e07251. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07251>.
- Amorim F, Rebelo H, Rodrigues L (2012) Factors influencing bat activity and mortality at a wind farm in the 192ort192h192n192nean region. *Acta Chiropterologica* 14:439–457. <https://doi.org/10.3161/150811012X661756>
- Appel G, López-Baucells A, Magnusson WE, Bobrowiec PED (2019) Temperature, rainfall, and moonlight intensity effects on activity of tropical insectivorous bats. *J Mammal* 100:1889–1900. <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyz140>
- Arnett EB, Baerwald EF (2013) Impacts of Wind Energy Development on Bats: Implications for Conservation. In : *Bat Evolution, Ecology, and Conservation*. Pp 1–547
- Arnett EB, Baerwald EF, Mathews F, et al (2016) Impacts of wind energy development on bats: a global perspective. In: *Bats in the Anthropocene: conservation of bats in a changing world*. Springer, Cham., pp 295–323
- Arnett EB, Brown WK, Erickson WP, et al (2008) Patterns of Bat Fatalities at Wind Energy Facilities in North America. *J Wildl Manage* 72 :61–78. <https://doi.org/10.2193/2007-221>
- Arnett EB, Huso MMP, Schirmacher MR, Hayes JP (2011) Altering turbine speed reduces bat mortality at wind-energy facilities. *Front Ecol Environ* 9 :209–214. <https://doi.org/10.1890/100103>
- Arnett EB, Huso MMP, Hayes JP, Schirmacher MR, (2010) Effectiveness of changing wind turbine cut-in speed to reduce bat fatalities at wind facilities. A final report submitted to the Bats and Wind Energy Cooperative. Bat Conservation International. Austin, Texas, USA.
- Arnett EB, May RF (2016) Mitigating wind energy impacts on wildlife: Approaches for multiple taxa. *Human-Wildlife Interact* 10 :28–41. <https://doi.org/10.26077/1jeg-7r13>
- Barclay, R. M., Harder, L. D., Kunz, T. H., & Fenton, M. B. (2003). Life histories of bats: life in the slow lane. *Bat ecology*, 209, 253.
- Bach P, Bach L, Kesel R (2020) Acoustic activity and fatalities of *Nathusius' pipistrelles* (*Pipistrellus nathusii*) at wind turbines at coastal areas in Northwestern Germany. In: Voigt CC (ed) *Evidenzbasierter Fledermausschutz in Windkraftvorhaben*, 77– 99. SpringerSpektrum, Berlin, Germany.
- Barataud, M., 2015. Acoustic ecology of 192ort192h192n bats: species identification, study of their habitats and foraging behaviour. In : *Collection Inventaires et biodiversité*, Biotope Editions. Mèze et Publications scientifiques du Muséum National d'Histoire, Naturelle, Paris. Barré K, Le Viol I, Bas Y, et al (2018) Estimating habitat loss due to wind turbine avoidance by bats: Implications for European siting guidance. *Biol Conserv* 226 :205–214. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.07.011>
- Barrientos R, Martins RC, Ascensão F, et al (2018) A review of searcher efficiency and carcass persistence in infrastructure-driven mortality assessment studies. *Biol Conserv* 222 :146–153. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.04.014>
- Bates D., Maechler M., Bolker B., et al (2021) Package 'lme4'
- Behr, O., et O. Von Helversen (2006). Gutachten zur Beein – trächtigung im freien Luftraum jagender und ziehender Fle – dermäuse durch bestehende Windkraftanlagen. Wirkungs – kontrolle zum Windpark "Roskopf" (Freiburg i Br.) im Jahr 2005. Report to Regiowind GmbH & Co., Freiburg.
- Behr O., Brinkmann R., Niermann I., Korner-Nievergelt F. (2011) Akustische Erfassung der Fledermausaktivität an Windenergieanlagen.- In: Briinkmann R., Behr O., Niermann I. und Reich M.(Hrsg.): *Entwicklung von Methoden zur Untersuchung und Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergieanlagen – Umwelt und Raum Bd. 4*, 177-286, Cuvillier Verlag, Göttingen.
- Behr O., Brinkmann R., Korner-Nievergelt F., Nagy M., Niermann I., Reich M., Simon R. (2015) Reduktion des Kollisions-risikos von Fledermäusen an Onshore-Windenergie-anlagen (RENEBAT II). Leibniz Universität Hannover. 374 p.
- Behr O, Brinkmann R, Hochradel K, et al (2017) Wind Energy and Wildlife Interactions. *Wind Energy Wildl Interact*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-51272-3>
- Bennett, Emma M., Stevie Nicole Florent, Mark Venosta, Matthew Gibson, Alex Jackson, et Elizabeth Stark. 2022. « Curtailment as a Successful Method for Reducing Bat Mortality at a Southern Australian Wind Farm ». *Austral Ecology* 47 (6): 1329–39. <https://doi.org/10.1111/aec.13220>.
- Beucher Y., Richou C., Albespy F. (2017) Maîtrise de la mortalité des chiroptères – Analyse comparée de la mise en place de mesures de régulation de trois parcs éoliens. *Actes du Séminaire Eolien et Biodiversité*. Artigues-près-Bordeaux. Nov. 2017. P. 81-87.
- Beucher Y., SFPEM (2020) Maîtrise des impacts éoliens sur les chauves-souris : actions et stratégie du Groupe Technique éolien de la SFPEM. *Symbioses* 2020, nouvelle série, 38 : 3-8

- Brinkmann R, Behr O, Niermann I, Hrsg MR (2011) Umwelt und Raum Entwicklung von Methoden zur Untersuchung und Reduktion des Kollisionsrisikos von Fledermäusen an Schriftenreihe Institut für Umweltplanung Leibniz Universität Hannover. Umwelt und Raum 4 :40–115
- Cryan PM (2008) Mating Behavior as a Possible Cause of Bat Fatalities at Wind Turbines. *J Wildl Manage* 72 :845–849. <https://doi.org/10.2193/2007-371>
- Cryan PM, Barclay RMR (2009) Causes of bat fatalities at wind turbines: Hypotheses and predictions. *J Mammal* 90 :1330–1340. <https://doi.org/10.1644/09-MAMM-S-076R1.1>
- Cryan PM, Gorresen PM, Hein CD, et al (2014) Behavior of bats at wind turbines. *Proc Natl Acad Sci U S A* 111:15126–15131. <https://doi.org/10.1073/pnas.1406672111>
- Dechmann DKN, Wikelski M, Ellis-Soto D, et al (2017) Determinants of spring migration departure decision in a bat. *Biol Lett* 13 :. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2017.0395>
- De Jong, J. ; Million, L. ; Håstad, O. ; Voctorsson, J. (2021) Activity pattern an correlation between bat and insect abundance at wind turbines in South Sweden. *Animals* 2021, 11, 3269. <https://doi.org/10.3390/ani11113269>
- Domínguez del Valle J, Cervantes Peralta F, Jaquero Arjona MI (2020) Factors affecting carcass detection at wind farms using dogs and human searchers. *J Appl Ecol* 57 :1926–1935. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13714>
- Ellerbrok J.S., Delius A., Peter F., Farwig N., Voigt C.C. (2022) Activity of forest specialist bats decreases towards wind turbines at forest sites. *Journal of Applied Ecology*. 2022;00:1–10. DOI: 10.1111/1365-2664.14249
- Erickson W., Strickland D., Johnson G. & Kern W., 2000. Examples of statistical methods to assess risk of impacts to birds from wind plants. National avian, Wind Power Planning Meeting III, San Diego, California: 172-182.
- Erickson JL, West SD (2002) The influence of regional climate and nightly weather conditions on activity patterns of insectivorous bats. *Acta Chiropterologica* 4:17–24. <https://doi.org/10.3161/001.004.0103>.
- Eurobats (2005) Report of the Intersessional Working Group on Wind Turbines and Bat Populations. 10th Meet Advis Committee, Bratislava, Slovak Republic, 25-27 April 2005 21 pp.
- European commission. 2020. « Guidance document on wind energy developments and EU nature legislation »
- Foo C. F., Bennett V.J., Hale A. M., Korstian J. M., Schildt A. J., Williams D. A. (2017) Increasing evidence that bats actively forage at wind turbines. *PeerJ* 5:e3985; DOI10.7717/peerj.3985
- Frick WF, Baerwald EF, Pollock JF, et al (2017) Fatalities at wind turbines may threaten population viability of a migratory bat. *Biol Conserv* 209:172–177. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.02.023>
- Friedenber, 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>.
- Fukui D, Murakami M, Nakano S, Aoi T (2006) Effect of emergent aquatic insects on bat foraging in a riparian forest. *J Anim Ecol* 75:1252–1258. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2006.01146.x>
- Geipel I., Smeekes M. J., Halfwerk W., Page R. A. (2019) Noise as an informational cue for decision-making : the sound of rain delays bat emergence. *The Company of Biologists Ltd | Journal of Experimental Biology* (2019) 222, jeb192005. Doi:10.1242/jeb.192005
- Geluso KN, Geluso K (2012) Effects of environmental factors on capture rates of insectivorous bats, 1971 – 2005. *J Mammal* 93:161–169. <https://doi.org/10.1644/11-MAMM-A-107.1>
- GIEC, 2019 : Résumé à l'intention des décideurs, Changement climatique et terres émergées : rapport spécial du GIEC sur le changement climatique, la désertification, la dégradation des sols, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres. [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.- O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (dir. Publ.)]. Sous presse
- Goerlitz HR (2018) Weather conditions determine attenuation and speed of sound: Environmental limitations for monitoring and analyzing bat echolocation. *Ecol Evol* 8:5090–5100. <https://doi.org/10.1002/ece3.4088>
- Gorresen MM, Cryan PM, Dalton DC, et al (2015) Dim ultraviolet light as a means of deterring activity by the Hawaiian hoary bat *Lasiurus cinereus semotus*. *Endanger Species Res* 28 :249–257. <https://doi.org/10.3354/esr00694>
- Gorresen PM, Cryan PM, Montoya-Aiona K, Bonaccorso FJ (2017) Do you hear what I see? Vocalization relative to visual detection rates of Hawaiian hoary bats (*Lasiurus cinereus semotus*). *Ecol Evol* 7 :6669–6679. <https://doi.org/10.1002/ece3.3196>
- Grodsky SM, Behr MJ, Gendler A, et al (2011) Investigating the causes of death for wind turbine-associated bat fatalities. *J Mammal* 92 :917–925. <https://doi.org/10.1644/10-MAMM-A-404.1>
- Groupe Chiroptères de la SFEPM, 2016. – Diagnostic chiroptérologique des projets éoliens terrestres Actualisation 2016 des recommandations SFEPM, Version 2.1 (février 2016). Société Française pour l'Étude et la Protection des Mammifères, Paris, 33 pages + annexes.

- Groupe Chiroptères de la SFPEM, 2016. – Suivi des impacts des parcs éoliens terrestres sur les populations de Chiroptères, Version 2.1 (février 2016). Société Française pour l'Étude et la Protection des Mammifères, Paris, 17 pages.
- Guest, E.E.; Stamps, B.F.; Durish, N.D.; Hale, A.M.; Hein, C.D.; Morton, B.P.; Weaver, S.P.; Fritts, S.R. 2022) An Updated Review of Hypotheses Regarding Bat Attraction to Wind Turbines. *Animals* 2022, 12, 343. <https://doi.org/10.3390/ani12030343>
- Hastie T.J., Tibshirani R.J. (1986) Generalized additive models. *Stat Sci* 1 :297–318
- Hayes MA, Hooton LA, Gilland KL, et al (2019) A smart curtailment approach for reducing bat fatalities and curtailment time at wind energy facilities. *Ecol Appl* 29 :1–18. <https://doi.org/10.1002/eap.1881>
- Heitz C., Jung L. / *Ecosphère* (2017) Impact de l'activité des éoliennes sur les populations de chiroptères : enjeux et solutions (étude bibliographique). 149 p.
- Horn JW, Arnett EB, Kunz TH (2008) Behavioral Responses of Bats to Operating Wind Turbines. *J Wildl Manage* 72 :123–132. <https://doi.org/10.2193/2006-465>
- Huso M.M.P. (2010) An estimator of wildlife fatality from observed carcasses. *Environmetrics*. DOI : 10.1002/env.
- Huso, Manuela, Som, Nicholas, and Ladd, Lew, (2018), Fatality estimator user's guide (ver. 1.2, December 2018): U.S. Geological Survey Data Series 729, 22 p., <https://doi.org/10.3133/ds729>.
- Jones G., 2009. Determining the potential ecological impact of wind turbines on bat populations in Britain. Final report, BCT, 150 pp.
- Kalcounis-rüppell AMC, Psyllakis JM, Brigham RM, et al (2005) Tree roost selection by bats : an empirical synthesis using. 33:1123–1132. [https://doi.org/https://doi.org/10.2193/0091-7648\(2005\)33\[1123:TRSBBA\]2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.2193/0091-7648(2005)33[1123:TRSBBA]2.0.CO;2)
- Korner-nievergelt F, Almasi B, Brinkmann R, et al (2013) Predicting bat collision rates : a comparison of two models. 67997
- Korner-Nievergelt F, Brinkmann R, Niermann I, Behr O (2013) Estimating Bat and Bird Mortality Occurring at Wind Energy Turbines from Covariates and Carcass Searches Using Mixture Models. *PloS One* 8 :. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067997>
- Kunz, Thomas H., Edward B. Arnett, Brian M. Cooper, Wallace P. Erickson, Ronald P. Larkin, Todd Mabee, Michael L. Morrison, M. Dale Strickland, et Joseph M. Szwedczak. 2007. « Assessing Impacts of Wind-Energy Development on Nocturnally Active Birds and Bats: A Guidance Document ». *Journal of Wildlife Management* 71 (8): 2449–86. <https://doi.org/10.2193/2007-270>.
- Kusch J, Idelberger S (2005) Spatial and temporal variability of bat foraging in a western European low mountain range forest. *Mammalia* 69:21–33. <https://doi.org/10.1515/mamm.2005.003>
- Langlois A, Beucher Y, Albespy F, Mounetou R (2017) Les pics d'activité des chauves-souris en plein ciel : vers une nouvelle perception de la typologie des risques d'impacts éoliens. Poster. Séminaire Eolien & Biodiversité. Artigues-près-Bordeaux. 21–22 septembre 2017
- Lefcheck J (2016) Package 'piecewiseSEM'
- Lehnert LS, Kramer-Schadt S, Schönborn S, et al (2014) Wind farm facilities in Germany kill noctule bats from near and far. *PloS One* 9 :. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0103106>
- Lenth R, Love J (2015) Ismeans: Least-Squares Means; R Package, Vienna, Austria. *J Stat Softw* 69 :1–33. <https://doi.org/10.1080/00031305.1980.10483031>>.NOTE
- Lin X, Zhang D (1999) Inference in generalized additive mixed models by using smoothing splines. *J R Stat Soc Ser B Stat Methodol* 61:381–400. <https://doi.org/10.1111/1467-9868.00183>
- Long C. V., Flint J. A., Lepper P. A. (2010) Insect attraction to wind turbines : Does colour play a role ? Author manuscript, published in "European Journal of Wildlife Research 57, 2 (2010) 323–331" DOI : 10.1007/s10344-010-0432-7
- Lund U, Agostinelli C, Arai H, et al (2017) "circular" : Circular Statistics (version 0.4-93). R Packag 138
- Maclaurin G., Hein C., Williams T., Roberts O., Lantz E., Buster G., Lopez A. (2022) National-scale impacts on wind energy production under curtailment scenarios to reduce bat fatalities. *Wind Energy*. 2022;25:1514–1529. DOI: 10.1002/we.2741
- Măntoiu, Dragoș Ștefan, Kseniia Kravchenko, Linn Sophia Lehnert, Anton Vlaschenko, Oana Teodora Moldovan, Ionuț Cornel Mirea, Răzvan Cătălin Stanciu, et al. 2020. « Wildlife and Infrastructure: Impact of Wind Turbines on Bats in the Black Sea Coast Region ». *European Journal of Wildlife Research* 66 (3): 44. <https://doi.org/10.1007/s10344-020-01378-x>.
- Martin CM, Arnett EB, Stevens RD, Wallace MC (2017) Reducing bat fatalities at wind facilities while improving the economic efficiency of operational mitigation. *J Mammal* 98:378–385. <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyx005>
- Mcguire LP, Guglielmo CG, Mackenzie SA, Taylor PD (2012) Migratory stopover in the long-distance migrant silver-haired bat, *Lasiurus noctivagus*. *J Anim Ecol* 81:377–385. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2011.01912.x>
- MEDDE (2015) Protocole de suivi environnemental des parcs éoliens terrestres. 40 p.
- MEEDDM (2010) Guide de l'étude d'impact sur l'environnement des parcs éoliens. Actualisation 2010. 191 p.

- MEED / DGPR (2016) Guide relatif à l'élaboration des études d'impacts des projets de parcs éoliens terrestres. 188 p.
- Millon L, Colin C, Brescia F, Kerbirou C (2018) Wind turbines impact bat activity, leading to high losses of habitat use in a biodiversity hotspot. *Ecol Eng* 112 :51–54. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.12.024>
- MTE (2020) Guide relatif à l'élaboration des études d'impacts des projets de parcs éoliens terrestres. 177 p.
- MTES / DGPR/ DGALN (2018) Protocole de suivi environnemental des parcs éoliens terrestres. Révision 2018. 20 p.
- Nicholls B, Racey PA (2007) Bats avoid radar installations: Could electromagnetic fields deter bats from colliding with wind turbines? *PloS One* 2 :. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000297>
- Nicholls B, Racey PA (2009) The aversive effect of electromagnetic radiation on foraging bats – A possible means of discouraging bats from approaching wind turbines. *PloS One* 4 :. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0006246>
- O'Shea TJ, Cryan PM, Hayman DTS, et al (2016) Multiple mortality events in bats: A global review. *Mamm Rev* 46 :175–190. <https://doi.org/10.1111/mam.12064>
- Pettit JL, O'Keefe JM (2017) Day of year, temperature, wind, and precipitation predict timing of bat migration. *J Mammal* 98 :1236–1248. <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyx054>
- Rabie PA, Welch-Acosta B, Nasman K, Schumacher S, Schueller S, Gruver J (2022) Efficacy and cost of acoustic-informed and wind speed-only turbine curtailment to reduce bat fatalities at a wind energy facility in Wisconsin. *PloS ONE* 17(4): e0266500. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0266500>
- Reynolds DS (2006) Monitoring the Potential Impact of A Wind Development Site on Bats in the Northeast. *J Wildl Manage* 70:1219–1227. [https://doi.org/https://doi.org/10.2193/0022-541X\(2006\)70\[1219:MTPIOA\]2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.2193/0022-541X(2006)70[1219:MTPIOA]2.0.CO;2)
- Richardson S.M., Lintott P.R., Hosken D. J., Economou T., Mathews F. (2021) Peaks in bat activity at turbines and the implications for mitigating the impact of wind energy developments on bats. *Scientific reports*, 11:3636. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82014-9>
- Rodrigues L, Bach L, Dubourg-Savage M-J, et al (2014) Lignes directrices pour la prise en compte des chauves-souris dans les projets éoliens
- Rodrigues L, Bach L, Dubourg-Savage M-J, et al (2015) Guidelines for consideration of bats in wind farm projects: Revision 2014
- Rodrigues L, Bach L., Dubourg-Savage M.-J., Karapandža B., Kovač D., Kervyn T., Dekker J., Kepel A., Bach P., Collins J., Harbusch C., Park K., Micevski B., Minderman J. (2015). Lignes directrices pour la prise en compte des chauves-souris dans les projets éoliens. Actualisation 2015. EUROBATS Publication Series N° 6 (version française). UNEP/EUROBATS Secrétariat, Bonn, Allemagne, 133 p.
- Rodrigues L, Palmeirim JM (2008) Migratory behaviour of the Schreiber's bat: When, where and why do cave bats migrate in a Mediterranean region? *J Zool* 274 :116–125. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.2007.00361.x>
- Roemer C, Disca T, Coulon A, Bas Y (2017) Bat flight height monitored from wind masts predicts mortality risk at wind farms. *Biol Conserv* 215 :116–122. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.09.002>
- Rosseel Y, Jorgensen TD, Rockwood N, et al (2021) Package 'lavaan'
- Rydell J, Bach L, Dubourg-Savage MJ, et al (2010) Mortality of bats at wind turbines links to nocturnal insect migration? *Eur J Wildl Res* 56 :823–827. <https://doi.org/10.1007/s10344-010-0444-3>
- Schuster E, Bulling L, Köppel J (2015) Consolidating the State of Knowledge: A Synoptical Review of Wind Energy's Wildlife Effects. *Environ Manage* 56 :300–331. <https://doi.org/10.1007/s00267-015-0501-5>
- Smallwood KS, Bell DA, Standish S (2020) Dogs Detect Larger Wind Energy Effects on Bats and Birds. *J Wildl Manage* 84 :852–864. <https://doi.org/10.1002/jwmg.21863>
- Smallwood, K. Shawn, et Douglas A. Bell. 2020b. « Relating Bat Passage Rates to Wind Turbine Fatalities ». *Diversity* 12 (2): 84. <https://doi.org/10.3390/d12020084>.
- Smallwood K. Shawn (2007) Estimating Wind Turbine–Caused Bird Mortality, " *Journal of Wildlife Management* 71(8), 2781-2791, (1 November 2007). <https://doi.org/10.2193/2007-006>
- Squires, K.A.; Thurber, B.G.; Zimmerling, J.R.; Francis, C.M. (2021) Timing and Weather Offer Alternative Mitigation Strategies for Lowering Bat Mortality at Wind Energy Facilities in Ontario. *Animals* 2021, 11, 3503. <https://doi.org/10.3390/ani11123503>
- Solick D, Pham D, Nasman K, Bay K (2020) Bat Activity Rates do not Predict Bat Fatality Rates at Wind Energy Facilities. *Acta Chiropterologica* 22:135. <https://doi.org/10.3161/15081109acc2020.22.1.012>
- Teague O'Mara M, Wikelski M, Kranstauber B, Dechmann DKN (2019) First three-dimensional tracks of bat migration reveal large amounts of individual behavioral flexibility. *Ecology* 100 :1–4. <https://doi.org/10.1002/ecy.2762>
- Thaxter CB et al. (2017) Bird and bat species' global vulnerability to collision mortality at wind farms revealed through a trait-based assessment. *Proc. R. Soc. B* 284: 20170829. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2017.0829>
- Thieurmél B, Elmarhraoui A (2019) Package 'suncalc.' 1–10
- Thompson M, Beston JA, Etterson M, et al (2017) Factors associated with bat mortality at wind energy facilities in the United States. *Biol Conserv* 215 :241–245. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.09.014>

- UICN France (2017) La Liste rouge des espèces menacées en France – Mammifères de France métropolitaine. Muséum d'histoire Nat 16
- UNEP/EUROBATS (2019) IWG on wind turbines and bat populations. DocEUROBATSAC245 Rev1 Rep IWG to 24th Meet Advis Committee, Skopje, North Maced 1-3 April Available online <https://www.eurobats.org/node/15711-3>
- Voigt CC (2021) Insect fatalities at wind turbines as biodiversity sinks. *Conserv Sci Pract* 3:1–5. <https://doi.org/10.1111/csp2.366>
- Voigt CC, Lehnert LS, Petersons G, et al (2015) Wildlife and renewable energy: German politics cross migratory bats. *Eur J Wildl Res* 61 :213–219. <https://doi.org/10.1007/s10344-015-0903-y>
- Voigt CC, Russo D, Runkel V, Goerlitz HR (2021) Limitations of acoustic monitoring at wind turbines to evaluate fatality risk of bats. *Mamm Rev* 51 :559–570. <https://doi.org/10.1111/mam.12248>
- Voigt CC, Scherer C, Runkel V (2022) Modeling the power of acoustic monitoring to predict bat fatalities at wind turbines. *Conservation Science and Practice*. 2022:e12841. DOI: 10.1111/csp2.12841
- Voigt CC, Schneeberger K, Voigt-Heucke SL, Lewanzik D (2011) Rain increases the energy cost of bat flight. *Biol Lett* 7:793–795. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2011.0313>
- Voigt, Christian C., Klara Kaiser, Samantha Look, Kristin Scharnweber, et Carolin Scholz. 2022. « Wind Turbines without Curtailment Produce Large Numbers of Bat Fatalities throughout Their Lifetime: A Call against Ignorance and Neglect ». *Global Ecology and Conservation* 37 (septembre): e02149. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02149>.
- Weinbeer M, Meyer CFJ, Kalko EKV (2006) Activity pattern of the trawling phyllostomid bat, *Macrophyllum macrophyllum*, in Panamá. *Biotropica* 38:69–76. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2006.00101.x>
- Whitby MD, Schirmacher MR, Frick WF (2021) The State of the Science on Operational Minimization to Reduce Bat Fatality at Wind Energy Facilities. A report submitted to the National Renewable Energy Laboratory. Bat Conservation International. Austin, Texas.
- Willmott JR, Forcey GM, Hooton LA (2015) Developing an automated risk management tool to minimize bird and bat mortality at wind facilities. *Ambio* 44 :557–571. <https://doi.org/10.1007/s13280-015-0707-z>
- Wolbert SJ, Zellner AS, Whidden HP (2014) Bat activity, insect biomass, and temperature along an elevational gradient. *Northeast Nat* 21 :72–85. <https://doi.org/10.1656/045.021.0106>
- Wood SN (2021) Package 'mgcv'
- Young D.P.Jr., Nomani S., Tidhar W.L. & Bay K. (2011) NedPower Mount Storm Wind Energy Facility post-construction avian and bat monitoring: July–October 2010. Western EcoSystems Technology, Inc. (WEST) report.

Annexe 2. Caractéristiques techniques Enercon E70/2000 (Volet 2)

Source : Enercon – document technique, E70, Version : 12/2004

DONNÉES TECHNIQUES

Modèle :	ENERCON E-70
Puissance nominale :	2000 kW
Diamètre du rotor :	71 m
Hauteur du moyeu :	64–113 m (tour en acier tubulaire, tour en béton préfabriqué, diverses possibilités de fondation)
Concept de l'éolienne :	Sans multiplicateur, vitesse de rotation variable, réglage indépendant de chaque pale
Rotor	
Type :	Face au vent à ajustage actif des pales
Sens de rotation :	Sens horaire
Nombre de pales :	3
Surface balayée :	3959 m ²
Matériau des pales :	Fibre de verre (résine époxy) protection parafoudre intégrée
Vitesse de rotation :	Variable, 6–21,5 tours/min
Vitesse linéaire en bout de pale :	22–80 m/s
Système de réglage des pales :	3 unités indépendantes avec système d'alimentation électrique de secours
Système d'entraînement	
Moyeu :	Rigide
Paliers principaux :	Un roulement à deux rangées de rouleaux coniques et un roulement à rouleaux cylindriques
Générateur :	Générateur synchrone ENERCON à accouplement direct
Alimentation du réseau :	Onduleur ENERCON
Système de freinage :	– 3 unités indépendantes avec alimentation de secours – Frein d'arrêt du rotor – Blocage du rotor
Contrôle d'orientation :	Actif par un mécanisme d'engrenages, amortissement proportionnel à la charge
Vitesse de vent de démarrage :	2,5 m/s
Vitesse de vent nominale :	13,5 m/s
Vitesse de vent de coupure :	28–34 m/s
Système de surveillance à distance :	ENERCON SCADA

Annexe 3. Relevé de mortalités (volet 2)

Date	Modalité de régulation	Obs	Eolienne	Distance du mat (m)	Direction du mat	Date mort estimée (jour)	Barotrauma / blessure	Espèce
02/07/2019	Mod 1	LN	E9	1.5	S	1	dos	Pipistrelle commune
22/07/2019	Mod 1	JC	E3	14	SE	1	Barotrauma	Noctule de Leisler
23/07/2019	Mod 1	CR	E7	30	NE	>2		Pipistrelle commune
24/07/2019	Mod 1	AC	E3	16	SO	1		Pipistrelle de Kuhl
19/08/2019	Mod 1	FA	E10	17	NE	1	Non	Pipistrelle commune
19/08/2019	Mod 1	FA	E10	22	SE	1	Non	Pipistrelle de Kuhl
25/08/2019	Mod 1	LL	E1	18	N	1		Pipistrelle commune
25/08/2019	Mod 1	LL	E1	15	NO	1	Patagium déchiré	Pipistrelle de Kuhl
25/08/2019	Mod 1	LL	E10	30	N/NO	1		Pipistrelle de Kuhl
27/08/2019	Mod 2	AC	E4	9	E	1	Non	Pipistrelle commune
04/09/2019	Mod 1	DC	E2	10	O	1	RAS	Pipistrelle commune
10/09/2019	Mod 2	AR	E9	49	SE	2		Pipistrelle de Nathusius
13/09/2019	Mod 1	CR	E11	35	SE	>2		Pipistrelle commune
16/09/2019	Mod 1	CG	E8	32	O	1		Pipistrelle commune
18/09/2019	Mod 2	DC	E1	15	N	01-févr		Pipistrelle de Kuhl
19/09/2019	Mod 1	ML	E8	28	NNE	1	RAS	Pipistrelle commune
19/09/2019	Mod 1	ML	E8	26	NNE	1		Pipistrelle commune
19/09/2019	Mod 1	ML	E8	28	N	1		Pipistrelle commune
24/09/2019	Mod 3	CG	E9	12	S	2		Pipistrelle commune
03/10/2019	?	CR/DC	E10	45	NE	01-févr		Noctule de Leisler
09/10/2019	?	AG/JA	E7	20	s	>5	?	Pipistrelle commune probable
09/07/2020	Mod 3	CR	E5	6	S	1	Blessure dos	Noctule de Leisler
20/07/2020	Mod 3	CM	E7	0	O	1	Non	Pipistrelle commune
20/07/2020	Mod 2	CM	E6	15	N	2	Non	Pipistrelle commune
21/07/2020	Mod 3	TM	E7	25	NO	1	Bras abimé	Pipistrelle commune
22/07/2020	Mod 1	CR	E9	15	SO	>2	Non	Pipistrelle commune
24/07/2020	Mod 3	DC	E7	28	SO	>2	Non	Pipistrelle commune
27/07/2020	Mod 2	EB	E6	26	E	1	bras	Pipistrelle commune
07/08/2020	Mod 1	DC	E1	5	E	1	Non	Pipistrelle de Kuhl
08/08/2020	Mod 1	AL	E2	26	NW	1	RAS	Pipistrelle commune
10/08/2020	Mod 3	PR	E11	10m	E	>5	Non	Pipistrelle commune
12/08/2020	Mod 3	CR	E4	5m	NE	>2	?	Pipistrelle commune
13/08/2020	Mod 1	DC	E2	33m	O	>3	bras abimé	Pipistrelle commune / Pipistrelle pygmée
14/09/2020	Mod 2	CM	E2	30m	NO	01-févr	Non	Pipistrelle commune
15/09/2020	Mod 1	DC	E8	21	E	1	Non	Noctule de Leisler
22/09/2020	Mod 2	DC	E5	29	SO	>2	?	Pipistrelle commune / Pipistrelle pygmée

Annexe 4. Groupes acoustiques étudiés (volet 2)

Abréviation	Nom vernaculaire ou groupe d'espèce	GROUPE			Remarques / incertitudes
		PIP	CHIRO	NOC	
Bbar	Barbastelle d'Europe		x		
Eser	Sérotine commune		x		
Hsav	Vespère de Savi		x		
Minio prob	Minioptère de Schreibers probable		x		
Misch	Mischptère de Schreibers		x		
MSch/Ppyg	Minioptère de Schreibers / Pipistrelle pygmée	x	x		Contacts de Minioptère de Schreibers inclus dans ce groupe
Myotis	Murin sp.		x		
Nlas	Grande noctule		x	x	
Nlei	Noctule de Leisler		x	x	
Nlei/Nnoc	Noctule de Leisler / Noctule commune		x	x	
Nnoc	Noctule commune		x	x	
Nnoc/Nlas	Noctule commune / Grande noctule		x	x	
Nyc	Noctule sp.		x	x	
Nycmi	Sérotule		x	x	Contacts de Sérotines inclus dans ce groupe (espèce de haut vol)
Nyctaloid	Sérotule		x	x	
Nyctief	Grande noctule / Molosse de Cestoni		x	x	Contacts de Molosse de Cestoni inclus dans ce groupe mais négligeable (très peu de contacts dans ce groupe)
Phoch	Minioptère de Schreibers / Pipistrelle pygmée / Pipistrelle commune	x	x		Contacts de Minioptère de Schreibers inclus dans ce groupe
Pipistrelloid	Pipistrelle sp.	x	x		
Pkuh	Pipistrelle de Kuhl	x	x		
Plecotus	Oreillard sp.		x		
Pmid	Pipistrelle de Kuhl / Pipistrelle de Nathusius	x	x		
Pnat	Pipistrelle de Nathusius	x	x		
Pnat/Ppip	Pipistrelle de Nathusius / Pipistrelle commune	x	x		
Ppip	Pipistrelle commune	x	x		
Ppyg	Pipistrelle pygmée	x	x		
Ptief	Pipistrelle de Kuhl / Vespère de Savi	x	x		Contacts de Vespère de Savi inclus dans ce groupe
Rfer	Grand rhinolophe		x		
Rhip	Petit rhinolophe		x		
Spec.	Chiroptère sp.		x		
Tten	Molosse de Cestoni		x		
Vmur/Nlei	Sérotine bicolore / Noctule de Leisler		x	x	Contacts de Sérotine bicolore inclus dans ce groupe mais négligeable (espèce rare)

Annexe 5. Résultats complémentaires de la partie 1 (volet 2)

1. Comparaison des modalités – Groupe CHIRO

Poisson – données de comptage

	Nb cadavres	Nb Jours mod	GLMM effet aléatoire éolienne			GLMM effet aléatoire éolienne+jour		
			mediane	lowIC	UpIC	mediane	lowIC	UpIC
mod1	19	430	0,044	0,027	0,070	0,018	0,010	0,037
mod2	7	348	0,020	0,010	0,041	0,008	0,003	0,021
mod3	7	440	0,016	0,008	0,033	0,007	0,003	0,017
mod4	0	348	0	0	0	0	0	0
mod5	0	348	0	0	0	0	0	0

modèle	AICc
mortT ~ 1 + (1 eolT)	344
202ort ~ as.factor(modT) + (1 eolT)	316
202ort ~ as.factor(modT) + (1 eolT) + (1 jourT)	308

Binomiale – données détection/non-détection

	Nb cadavres	Nb Jours mod	GLMM effet aléatoire éolienne			GLMM effet aléatoire éolienne+jour		
			mediane	lowIC	UpIC	mediane	lowIC	UpIC
mod1	19	430	0,035	0,021	0,061	0,035	0,021	0,057
mod2	7	348	0,020	0,010	0,043	0,020	0,009	0,041
mod3	7	440	0,016	0,008	0,034	0,016	0,008	0,033
mod4	0	348	0	0	0	0	0	0
mod5	0	348	0	0	0	0	0	0

modèle	AICc
mortT ~ 1 + (1 eolT)	305
202ort ~ as.factor(modT) + (1 eolT)	283
202ort ~ as.factor(modT) + (1 eolT) + (1 jourT)	285

Prise en compte de la sur-dispersion des données

Binomiale négative – données de comptage

	Nb cadavres	Nb Jours mod	GLMM effet aléatoire éolienne			GLMM effet aléatoire éolienne+jour		
			median e	lowIC	UpIC	mediane	lowIC	UpIC
mod1	19	430	0,044	0,028	0,070	0,018	0,010	0,035
mod 2	7	348	0,020	0,009	0,043	0,009	0,003	0,023
mod 3	7	440	0,016	0,008	0,033	0,007	0,003	0,018
mod 4	0	348	0	0	0	0	0	0
mod 5	0	348	0	0	0	0	0	0

modèle	AICc
mortT ~ 1 + (1 eoIT)	341
203ort ~ as.factor(modT) + (1 eoIT)	312
203ort ~ as.factor(modT) + (1 eoIT) + (1 jourT)	307

2. Comparaison des modalités – Groupe PIP

Poisson – données de comptage

	Nb cadavres	Nb Jours mod	GLMM effet aléatoire éolienne			GLMM effet aléatoire éolienne+jour		
			mediane	lowIC	UpIC	mediane	lowIC	UpIC
mod1	17	430	0,040	0,025	0,063	0,012	0,006	0,025
mod2	7	348	0,020	0,010	0,042	0,006	0,002	0,017
mod3	6	440	0,014	0,006	0,031	0,005	0,002	0,013
mod4	0	348	0	0	0	0	0	0
mod5	0	348	0	0	0	0	0	0

modèle	AICc
mortT ~ 1 + (1 eoIT)	320
203ort ~ as.factor(modT) + (1 eoIT)	294
203ort ~ as.factor(modT) + (1 eoIT) + (1 jourT)	285

Binomiale – données détection/non-détection

	Nb cadavres	Nb Jours mod	GLMM effet aléatoire éolienne			GLMM effet aléatoire éolienne+jour		
			mediane	lowIC	UpIC	mediane	lowIC	UpIC
mod1	17	430	0,030	0,017	0,053	0,014	0,007	0,030
mod2	7	348	0,020	0,010	0,044	0,009	0,003	0,024
mod3	6	440	0,014	0,006	0,031	0,006	0,002	0,017
mod4	0	348	0	0	0	0	0	0
mod5	0	348	0	0	0	0	0	0

modèle	AICc
mortT ~ 1 + (1 eolT)	279
204ort ~ as.factor(modT) + (1 eolT)	261
204ort ~ as.factor(modT) + (1 eolT) + (1 jourT)	260

Prise en compte de la sur-dispersion des données

Binomiale négative – données de comptage

	Nb cadavres	Nb Jours mod	GLMM effet aléatoire éolienne			GLMM effet aléatoire éolienne+jour		
			mediane	lowIC	UpIC	mediane	lowIC	UpIC
mod1	17	430	0,040	0,024	0,065	0,012	0,006	0,026
mod2	7	348	0,020	0,009	0,043	0,007	0,002	0,018
mod3	6	440	0,014	0,006	0,031	0,005	0,002	0,014
mod4	0	348	0	0	0	0	0	0
mod5	0	348	0	0	0	0	0	0

modèle	AICc
mortT ~ 1 + (1 eolT)	316
204ort ~ as.factor(modT) + (1 eolT)	291
204ort ~ as.factor(modT) + (1 eolT) + (1 jourT)	284

Annexe 6. Activités enregistrées les deux nuits précédant une mortalité au sol et en altitude pour les deux groupes étudiés (Volet 2)

id (date_eol)	Espèce	Ancienneté	Activité - 1ère nuit précédant la découverte du cadavre												Activité 2ème nuit précédant la découverte du cadavre											
			Nacelle						Base						Nacelle						Base					
			CHIRO			PIP			CHIRO			PIP			CHIRO			PIP			CHIRO			PIP		
			TPC	SSP	NBC	TPC	SSP	NBC	TPC	SSP	NBC	TPC	SSP	NBC	TPC	SSP	NBC	TPC	SSP	NBC	TPC	SSP	NBC	TPC	SSP	NBC
2019-07-21_E3	Nle	1	47	21	171				174	65	1406				50	27	153				313	126	2078			
2019-07-22_E7	Ppi	> 2	10	7	14	3	2	6	231	105	1550	173	81	1119	15	5	18	0	0	0	380	145	2972	320	118	2297
2019-07-23_E3	Pku	1	0	0	0	0	0	0	47	23	276	47	23	276	21	11	82	17	9	68	148	60	921	134	56	809
2019-08-18_E10	Ppi, Pku	1	0	0	0	0	0	0	144	60	554	132	53	526	0	0	0	0	0	0	31	18	114	24	16	71
2019-08-24_E1	Ppi, Pku	1	30	15	138	24	10	126	118	50	835	102	41	720	4	2	9	2	1	6	223	91	1545	199	80	1396
2019-08-24_E10	Pku	1	9	5	31	9	5	31	76	39	209	60	31	184	0	0	0	0	0	0	293	114	1286	276	108	1213
2019-08-26_E4	Ppi	1	0	0	0	0	0	0	4	4	18	2	2	13	16	5	62	0	0	0	55	27	408	39	20	287
2019-09-03_E2	Ppi	1	100	42	590	82	33	530	129	53	828	105	41	707	4	1	14	0	0	0	18	10	120	7	3	45
2019-09-09_E9	Pna	2	24	9	60	7	2	17	100	41	439	65	25	337	0	0	0	0	0	0	14	7	39	3	1	14
2019-09-12_E11	Ppi	> 2	16	8	43	15	7	41	46	22	155	34	16	113	93	36	294	84	30	275	62	28	207	50	21	161
2019-09-15_E8	Ppi	1	0	0	0	0	0	0	33	18	94	8	5	22	1	1	2	0	0	0	21	12	36	3	3	3
2019-09-17_E1	Pku	1 ou 2	45	21	203	33	16	160	73	34	455	41	20	247	95	40	370	33	14	147	178	69	1179	109	40	798
2019-09-18_E8	3xPpi	1	0	0	0	0	0	0	118	55	517	100	44	491	18	7	27	2	2	4	111	49	316	49	21	171
2019-09-23_E9	Ppi	2	10	5	28	4	1	19	69	32	285	50	21	236	5	5	3	0	0	0	38	14	112	15	6	77
2020-07-08_E5	Nle	1	63	38	123				814	345	2768				120	52	291				207	91	722			
2020-07-19_E6	Ppi	1	260	111	614	15	10	34	122	55	386	96	46	296	1	1	1	0	0	0	174	65	741	139	53	615
2020-07-19_E7	Ppi	2	103	25	224	87	20	202	637	132	2506	562	114	2168	0	0	0	0	0	0	205	85	868	171	73	712
2020-07-20_E7	Ppi	1	8	6	6	5	4	3	189	85	727	164	73	673	103	25	224	87	20	202	637	132	2506	562	114	2168
2020-07-21_E9	Ppi	> 2	3	1	3	0	0	0	13	8	40	12	7	32	1	1	1	1	1	1	77	43	227	72	38	218
2020-07-23_E7	Ppi	> 2	0	0	0	0	0	0	397	153	1824	371	141	1720	3	2	0	0	0	0	2469	852	12922	2383	814	12566
2020-07-26_E6	Ppi	1	12	9	13	0	0	0	165	68	727	148	57	678	0	0	0	0	0	0	65	29	237	40	17	144
2020-08-06_E1	Pku	1	20	10	56	20	10	56	139	68	426	121	59	392	56	31	170	49	27	155	187	85	599	154	72	474
2020-08-07_E2	Ppi	1	4	3	9	4	3	9	221	99	761	218	97	755	30	11	97	30	11	97	175	77	596	159	71	553
2020-08-09_E11	Ppi	> 5	1	1	1	1	1	1	39	22	125	35	20	107	20	9	55	19	8	55	189	90	589	183	85	572
2020-08-11_E4	Ppi	> 2	2	2	1	2	2	1	35	15	157	33	14	147	0	0	0	0	0	0	22	13	77	18	10	71
2020-08-12_E2	Psp	> 3	6	6	4	0	0	0	64	31	205	62	30	195	0	0	0	0	0	0	69	32	185	45	25	136
2020-09-13_E2	Ppi	1 ou 2	2	2	1	0	0	0	10	5	28	6	3	21	0	0	0	0	0	0	40	16	117	20	7	86
2020-09-14_E8	Nle	1	0	0	0				0	0	0				0	0	0				9	6	27			
2020-09-21_E5	Psp	> 2	0	0	0	0	0	0	57	34	116	5	3	19	0	0	0	0	0	0	67	32	263	46	19	202

Annexe 7. Résultats complémentaires de la table 3 (volet 2)

Table 3 (compléments). Evaluation des différents modèles additifs généralisés à effets mixtes réalisés pour expliquer la mortalité sous les éoliennes non-régulées avec différentes variables d'activité mesurées en nacelle ou à la base de l'éolienne. CHIRO : pour l'ensemble des espèces ; PIP : pour le groupe des pipistrelles seulement. R^2 = pseudo- R^2 ; F = statistique F ; p = valeur de p. En gras les modèles avec résultats significatifs ($p < 0,1$). Code modèle : première lettre B = Base et N = nacelle ; deuxième lettre B = binomial suivi du numéro du modèle.

Position	Groupe	Famille	code	Variable explicative	Date de mortalité Non corrigée			Date de mortalité corrigée		
					R^2	F	p	R^2	F	p
NACELLE	CHIRO	Poisson	NP1	temps d'activité cumulé	0	0,040	0,842	0	0,312	0,577
			NP2	minute positive	0	0,820	0,366	0	0,739	0,390
			NP3	5-secondes positives	0	0,076	0,783	0	0,271	0,603
			NP4	nombre total de cris	0	0,188	0,664	0	0,453	0,501
			NP5	nombre de pics (> moyenne)	0	0,083	0,773	0	1,678	0,196
			NP6	nombre de pics (> 3 ^e quartile (75%))	0	0,349	0,555	0	1,860	0,173
		Binomial	NB1	temps d'activité cumulé	0	0,101	0,751	0	0,540	0,463
			NB2	minute positive	0	0,860	0,560	0	0,654	0,691
			NB3	5-secondes positives	0	1,116	0,299	0	0,226	0,801
			NB4	nombre total de cris	0	0,281	0,596	0	0,647	0,422
			NB5	nombre de pics (> moyenne)	0	0,095	0,759	0,001	2,414	0,121
			NB6	nombre de pics (> 3 ^e quartile (75%))	0	0,607	0,436	0,001	2,968	0,086
	PIP	Poisson	NP1	temps d'activité cumulé	0	0,135	0,713	0,001	0,477	0,479
			NP2	minute positive	0	0,299	0,585	0	0,761	0,437
			NP3	5-secondes positives	0	0,237	0,626	0,002	0,762	0,390
			NP4	nombre total de cris	0	0,256	0,613	0	0,549	0,459
			NP5	nombre de pics (> moyenne)	0	0,000	0,990	0	0,472	0,492
			NP6	nombre de pics (> 3 ^e quartile (75%))	0	0,342	0,559	0	2,266	0,133
		Binomial	NB1	temps d'activité cumulé	0	0,204	0,652	0	0,924	0,490
			NB2	minute positive	0	1,156	0,498	0	0,634	0,437
			NB3	5-secondes positives	0	0,646	0,422	0	0,824	0,594
			NB4	nombre total de cris	0	0,343	0,558	0	1,167	0,520
			NB5	nombre de pics (> moyenne)	0	0,024	0,876	0	0,942	0,332
			NB6	nombre de pics (> 3 ^e quartile (75%))	0	0,208	0,649	0	2,766	0,097
BASE	CHIRO	Poisson	BP1	temps d'activité cumulé	0	0,107	0,743	0	0,434	0,510
			BP2	minute positive	0	2,442	0,119	0,015	5,534	0,032
			BP3	5-secondes positives	0	0,340	0,560	0	0,816	0,367
			BP4	nombre total de cris	0	0,085	0,770	0	0,488	0,485
			BP5	nombre de pics (> moyenne)	0,000	3,150	0,077	0,005	6,122	0,014
			BP6	nombre de pics (> 3 ^e quartile (75%))	0,004	6,024	0,015	0,010	8,782	0,003
		Binomial	BB1	temps d'activité cumulé	0	0,001	0,991	0	0,003	0,959
			BB2	minute positive	0	1,969	0,161	0,012	3,244	0,081
			BB3	5-secondes positives	0	0,262	0,609	0	0,801	0,371
			BB4	nombre total de cris	0	0,062	0,803	0	0,553	0,458
			BB5	nombre de pics (> moyenne)	0	1,144	0,285	0	1,739	0,187
			BB6	nombre de pics (> 3 ^e quartile (75%))	0	2,054	0,152	0	1,968	0,161
	PIP	Poisson	BP1	temps d'activité cumulé	0	0,288	0,592	0	0,761	0,384
			BP2	minute positive	0,011	4,604	0,046	0,019	10,346	0,006
			BP3	5-secondes positives	0	0,777	0,378	0	1,101	0,264
			BP4	nombre total de cris	0	0,073	0,786	0	0,437	0,509
			BP5	nombre de pics (> moyenne)	0,017	5,347	0,028	0,024	11,846	0,005
			BP6	nombre de pics (> 3 ^e quartile (75%))	0,026	7,818	0,011	0,032	11,983	0,005
		Binomial	BB1	temps d'activité cumulé	0	0,228	0,633	0	0,782	0,377
			BB2	minute positive	0,000	3,918	0,048	0,020	7,525	0,014
			BB3	5-secondes positives	0	0,722	0,396	0,006	1,612	0,208
			BB4	nombre total de cris	0	0,026	0,871	0	0,073	0,787
			BB5	nombre de pics (> moyenne)	0,002	4,174	0,042	0,016	9,005	0,003
			BB6	nombre de pics (> 3 ^e quartile (75%))	0,018	4,077	0,053	0,025	9,766	0,009

Annexe 8. Relation entre activité en nacelle et activité au sol (volet 2)

Table 4. Relations entre l'activité à la base de l'éolienne et l'activité en nacelle prédites suivant différente métrique d'activités considérées. Avec mod01 uniquement

Variable de réponse (NACELLE)	Variable explicative (BASE)	CHIRO			PIP			NOC		
		R ²	F	p	R ²	F	p	R ²	F	p
minute positive	temps d'activité cumulé	0,122	33,6	***	0,005	12,4	**	0,155	16,5	***
	minute positive	0,150	73,7	***	0,012	31,5	***	0,181	22,7	***
	5-secondes positives	0,156	39,0	***	0,010	15,4	**	0,193	24,6	***
	nombre total de cris	0,034	25,3	***	0,001	2,1	ns	0,127	10,7	**
	nombre de pics (PMEAN)	0,057	26,9	***	0,003	15,6	***	0,051	13,8	***
	nombre de pics (P75)	0,052	28,4	***	0,004	7,4	**	0,052	13,1	***
nombre de pics (PMEAN)	temps d'activité cumulé	0,119	33,3	***	0,007	2,7	ns	0,114	10,2	**
	minute positive	0,107	38,1	***	0,000	2,4	ns	0,094	13,7	***
	5-secondes positives	0,124	36,4	***	0,006	2,9	.	0,123	12,4	**
	nombre total de cris	0,066	23,8	***	-0,001	1,4	ns	0,092	10,5	**
	nombre de pics (PMEAN)	0,090	25,7	***	-0,002	1,7	ns	0,028	8,0	**
	nombre de pics (P75)	0,082	21,6	***	-0,001	1,7	ns	0,029	7,8	**
nombre de pics (P75)	temps d'activité cumulé	0,124	33,6	***	0,003	1,7	ns	0,114	10,2	**
	minute positive	0,103	38,9	***	0,010	4,2	*	0,094	13,7	***
	5-secondes positives	0,131	36,5	***	0,005	2,3	ns	0,123	12,4	**
	nombre total de cris	0,051	23,4	***	-0,002	0,6	ns	0,092	10,5	**
	nombre de pics (PMEAN)	0,075	21,8	***	0,000	1,5	ns	0,028	8,0	**
	nombre de pics (P75)	0,073	20,8	***	0,001	2,2	ns	0,029	7,8	**

Annexe 9. Données météorologiques associées aux nuits précédant une mortalité (volet 2)

Date (nuit précédente)	Eolienne	Modalite	Espèce	Vent (m/s)	Température (°C)	Vitesse du rotor (tr/min)	Humidité moyenne	Humidité max	Precipitation (mm)	Direction du vent dominant
21/07/2019	E3	mod01	Nle	3.06 ± 1.36	22.19 ± 0.73	7.64 ± 2.35	83	91	0	NO
21/07/2019		mod01		3.36 ± 1.17	25.28 ± 1.51	5.43 ± 4.65	60	73	0	SE
22/07/2019	E7	mod01	Ppi	4.63 ± 1	25.69 ± 1.19	10.21 ± 2.21	60	73	0	SE
23/07/2019	E3	mod01	Pku	6.19 ± 1.87	23.41 ± 1.24	12.69 ± 4.43	46	53	0	SE
18/08/2019	E10	mod01	Ppi+Pku	4.13 ± 1.7	16.35 ± 2.5	8.65 ± 3.91	97	99	2	NO
24/08/2019	E10	mod01	Pku	2.83 ± 0.56	21.45 ± 1.38	7.31 ± 0.82	58	70	0	SO
24/08/2019	E1	mod01	Ppi+Pku	2.84 ± 0.7	21 ± 1.32	7.43 ± 0.97	58	70	0	SO
26/08/2019	E4	mod02	Ppi	7.27 ± 0.65	18.87 ± 1.35	15.14 ± 1.39	57	65	0	SE
03/09/2019	E2	mod01	Ppi	2.72 ± 1.11	16.31 ± 1.5	7.12 ± 1.92	55	60	0	NO
08/09/2019		mod02		2.9 ± 1.89	8.69 ± 1.58	5.97 ± 4.67	68	76	0	NE
09/09/2019	E9	mod02	Pna	2.53 ± 1.21	10.73 ± 1.29	2.21 ± 3.15	68	98	5	SO
11/09/2019		mod01		3.83 ± 2.27	14.73 ± 1.48	8.3 ± 5.05	58	69	0	NO
12/09/2019	E11	mod01	Ppi	5.17 ± 1.6	18.49 ± 1.09	10.91 ± 3.39	60	67	0	SE
15/09/2019	E8	mod01	Ppi	5.79 ± 1.14	19.57 ± 1.16	12.24 ± 2.01	50	67	0	SE
16/09/2019		mod02		3.52 ± 1.58	20.64 ± 1.8	6.82 ± 4.58	58	64	0	NO
17/09/2019	E1	mod02	Pku	4.03 ± 0.92	19.99 ± 2.11	8.4 ± 3.31	62	68	0	SE
18/09/2019	E8	mod01	3xPpi	3.42 ± 1.55	15.29 ± 1.29	7.66 ± 3.29	88	96	2	NE
22/09/2019		mod03		4.69 ± 0.84	9.61 ± 0.49	10.17 ± 1.45	98	98	0	NO
23/09/2019	E9	mod03	Ppi	2.43 ± 1.13	12.08 ± 0.28	5.89 ± 3.08	82	91	0	NO
08/07/2020	E5	mod03	Nle	2.49 ± 0.71	19.63 ± 0.89	6.35 ± 2.08	58	67	0	NO
18/07/2020		mod03		6.25 ± 1.12	17.72 ± 1.27	13.25 ± 1.88	60	64	0	NE
19/07/2020	E7	mod03	Ppi	2.65 ± 0.87	20.85 ± 1.78	6.75 ± 2.09	55	61	0	SO
19/07/2020	E6	mod01	Ppi	2.77 ± 0.82	21.26 ± 1.53	7.03 ± 1.93	55	61	0	SO
20/07/2020	E7	mod03	Ppi	3.43 ± 1	21.74 ± 1.77	8.16 ± 1.55	64	76	0	SO
20/07/2020		mod03		3.69 ± 1.06	20.96 ± 1.67	1.29 ± 0.71	64	76	0	SO
21/07/2020	E9	mod01	Ppi	6.83 ± 2.07	18.91 ± 1.19	3.39 ± 3.09	73	85	0	SE
22/07/2020		mod03		3.21 ± 0.72	20.72 ± 0.92	7.71 ± 0.99	75	82	0	NO
23/07/2020	E7	mod03	Ppi	5.11 ± 1.06	19.67 ± 1.37	10.96 ± 1.88	73	79	0	NO
26/07/2020	E6	mod01	Ppi	2.37 ± 1.36	17.71 ± 1.18	4.06 ± 4.08	75	85	0	NO
06/08/2020	E1	mod01	Pku	5.39 ± 1.47	22.62 ± 2.55	11.7 ± 2.46	42	46	0	SE
07/08/2020	E2	mod01	Ppi	4.34 ± 1.91	23.83 ± 2.87	9.44 ± 3.53	57	74	0	SO
08/08/2020	E11	mod03	Ppi	3.84 ± 1.38	25.14 ± 1.81	4.37 ± 5	61	74	0	NO

09/08/2020		mod03		6.61 ± 2.02	24.34 ± 0.93	11.13 ± 6.92	57	65	0	SE
10/08/2020	E4	mod03	Ppi	6.97 ± 1.29	19.52 ± 0.9	13.68 ± 3.12	68	76	0	SE
11/08/2020		mod03		7.48 ± 2.03	20.2 ± 1.39	13.24 ± 3.92	64	85	0	SE
11/08/2020	E2	mod01	Psp	7.13 ± 1.79	19.97 ± 1.56	8.38 ± 5.17	64	85	0	SE
12/08/2020		mod01		6.75 ± 1.94	15.68 ± 1.91	10.13 ± 6.23	86	97	11	SE
12/09/2020	E2	mod02	Ppi	5.9 ± 1.42	18.54 ± 1.07	12.21 ± 3.85	51	56	0	NE
13/09/2020		mod02		7.19 ± 1.39	19.1 ± 1.84	5.33 ± 4.34	57	63	0	SE
14/09/2020	E8	mod01	Nle	11.1 ± 1.54	18.26 ± 1.06	11.32 ± 7.39	50	54	0	SE
20/09/2020	E5	mod02	Psp	2.42 ± 0.79	12.67 ± 0.77	1.79 ± 2.31	95	99	0	SO
21/09/2020		mod02		3.09 ± 1.01	11.72 ± 0.78	4.31 ± 4.07	95	98	6	SO

En gris : date corrigée pour les cadavres plus anciens que 24h

Annexe 10. Résultats complémentaires à la Table 5 (volet 2)

Groupe	Famille	Code	Variable explicative	Date de mortalité non-corrigée			Date de mortalité corrigée			
				R_sq	F	p	R_sq	F	p	
CHIRO	Poisson	CHIRO-P1	vent	0,000	0,627	0,429	0	2,027	0,681	
		CHIRO-P2	vitesse du rotor	0	1,572	0,211	0,001	3,567	0,060	
		CHIRO-P3	température	0,024	9,886	0,002	0,017	9,616	0,002	
		CHIRO-P4	direction du vent	0,002	1,590	0,208	0	0,054	0,817	
		CHIRO-P5	précipitation (heure)	0	0,013	0,908	0	0,301	0,583	
		CHIRO-P6	précipitation (mm)	0	0,257	0,613	0	0,209	0,648	
		CHIRO-P7	date ::2019	0	0,045	0,832	0	0,035	0,851	
		date ::2020		0,028	0,868		0,037	0,848		
		Binomial	CHIRO-B1	vent	0	0,164	0,686	0,003	1,373	0,242
	CHIRO-B2		vitesse du rotor	0	1,168	0,280	0,003	3,431	0,065	
	CHIRO-B3		température	0,053	13,083	0,000	0,036	12,469	0,000	
	CHIRO-B4		direction du vent	0,007	2,727	0,099	0,004	0,547	0,534	
	CHIRO-B5		précipitation (heure)	0	0,163	0,687	0,000	0,817	0,367	
	CHIRO-B6		précipitation (mm)	0	0,170	0,681	0	0,505	0,478	
CHIRO-B7	date ::2019		0	0,004	0,952	0	0,000	0,999		
	date ::2020		0,001	0,971		0,013	0,925			
PIP	Poisson	PIP-P1	vent	0,001	1,630	0,202	0,006	3,964	0,047	
		PIP-P2	vitesse du rotor	0	0,289	0,591	0	0,736	0,391	
		PIP-P3	température	0,020	8,173	0,004	0,014	7,913	0,005	
		PIP-P4	direction du vent	0,000	1,129	0,289	0	0,278	0,598	
		PIP-P5	précipitation (heure)	0	0,005	0,946	0	0,154	0,695	
		PIP-P6	précipitation (mm)	0	0,443	0,506	0	0,119	0,730	
		PIP-P7	date ::2019	0	0,374	0,541	0	0,343	0,558	
		date ::2020		0,365	0,546		0,399	0,528		
		Binomial	PIP-B1	vent	0	0,026	0,872	0	0,467	0,494
	PIP-B2		vitesse du rotor	0	1,161	0,282	0,003	3,633	0,057	
	PIP-B3		température	0,048	11,027	0,001	0,031	10,457	0,001	
	PIP-B4		direction du vent	0,005	2,047	0,153	0,005	0,577	0,439	
	PIP-B5		précipitation (heure)	0	0,036	0,850	0	0,540	0,463	
	PIP-B6		précipitation (mm)	0	0,389	0,533	0	0,361	0,548	
PIP-B7	date ::2019		0	0,046	0,830	0	0,033	0,855		
	date ::2020		0,553	0,458		0,603	0,438			

Annexe 11. Résultats complémentaires à la Table 5 (volet 2)

Mesure de Variable l'activité d'activité Variables explicatives			Eoliennes non-régulée (mod01)						Toutes éoliennes					
			CHIRO		PIP		NOC		CHIRO		PIP		NOC	
			R ²	AICc	R ²	AICc	R ²	AICc	R ²	AICc	R ²	AICc	R ²	AICc
BASE	SEC	temp + vent	0,27	3758	0,28	3352	0,01	2104	0,20	16534	0,19	14812	0,03	9044
		temp + vent + date	0,36	3747	0,38	3346	0,10	2061	0,25	16521	0,24	14795	0,08	8987
		temp + vent + pluie	0,26	3758	0,28	3354	0,01	2073	0,20	16532	0,19	14814	0,03	8926
		temp + vent + date + pluie	0,38	3748	0,37	3349	0,10	2035	0,24	16522	0,23	14798	0,08	8874
	MIN	temp + vent	0,45	3383	0,49	3006	0,02	1821	0,42	14973	0,42	13286	0,04	7885
		temp + vent + date	0,51	3379	0,55	3004	0,28	1765	0,46	14957	0,47	13266	0,14	7805
		temp + vent + pluie	0,45	3383	0,48	3009	0,03	1791	0,41	14971	0,41	13288	0,04	7777
		temp + vent + date + pluie	0,51	3382	0,54	3008	0,27	1741	0,46	14958	0,47	13269	0,15	7700
	NUIT	temp + vent	0,20	104	0,31	161	0,05	475	0,33	311	0,46	571	0,07	1900
		temp + vent + date	0,21	112	0,34	167	0,14	463	0,33	318	0,46	574	0,15	1844
		temp + vent + pluie	0,24	104	0,31	165	0,09	464	0,37	307	0,47	572	0,09	1870
		temp + vent + date + pluie	0,24	112	0,34	171	0,16	455	0,38	314	0,47	575	0,16	1816
NACELLE	SEC	temp + vent	0,07	1904	0,00	990	0,11	1609	0,04	8749	0,01	4541	0,10	7592
		temp + vent + date	0,16	1886	0,02	977	0,22	1598	0,06	8720	0,02	4517	0,12	7568
		temp + vent + pluie	0,07	1906	0,00	990	0,10	1599	0,04	8753	0,01	4542	0,10	7511
		temp + vent + date + pluie	0,20	1889	0,02	978	0,22	1590	0,06	8724	0,02	4519	0,13	7489
	MIN	temp + vent	0,11	1630	0,03	832	0,10	1383	0,13	7286	0,05	3559	0,13	6316
		temp + vent + date	0,31	1606	0,08	817	0,26	1368	0,18	7251	0,08	3535	0,19	6290
		temp + vent + pluie	0,11	1633	0,03	832	0,10	1374	0,13	7291	0,05	3560	0,13	6243
		temp + vent + date + pluie	0,33	1610	0,08	819	0,27	1359	0,18	7255	0,08	3537	0,20	6218
	NUIT	temp + vent	0,20	476	0,13	378	0,15	518	0,20	1936	0,18	1423	0,16	2108
		temp + vent + date	0,27	471	0,27	363	0,18	520	0,24	1913	0,27	1396	0,20	2089
		temp + vent + pluie	0,21	477	0,13	378	0,15	516	0,21	1938	0,19	1424	0,16	2087
		temp + vent + date + pluie	0,28	474	0,28	365	0,19	519	0,25	1914	0,28	1397	0,20	2069

Annexe 12. Examen des modalités mises œuvre effective (volet 2)

Table 1. Fonctionnement des éoliennes en fonction des différentes modalités. Les pourcentages ont été calculés en fonction du temps cumulé de mise en œuvre prévu pour chaque modalité. Une modalité regroupe plusieurs éoliennes. La classification pour chaque catégorie a été réalisée avec les séquences de 10-minutes correspondant à la résolution maximale des données climatiques (vent et température) et techniques (cad vitesse du rotor). Les séquences de transition, c'est-à-dire le temps nécessaire à l'éolienne pour une mise en drapeaux lorsque les seuils de régulation sont atteints sont classés dans « pas régulée mais devrait l'être » entraînant une surestimation de l'erreur dans cette catégorie.

Modalité	Normal		Anormal	
	Pas régulée	Régulée	Pas régulée mais devrait l'être	Régulée (ou arrêtée) mais ne devrait pas l'être
Mod01 (témoin)	91%	/	/	9%
Mod02 (<3m/s)	77%	11%	5%	7%
Mod03 (<4.5m/s & >10°C)	56%	28%	9%	7%
Mod04 (<6m/s & >10°C)	42%	38%	17%	3%
Mod05 (<6m/s & >15°C)	62%	23%	11%	4%

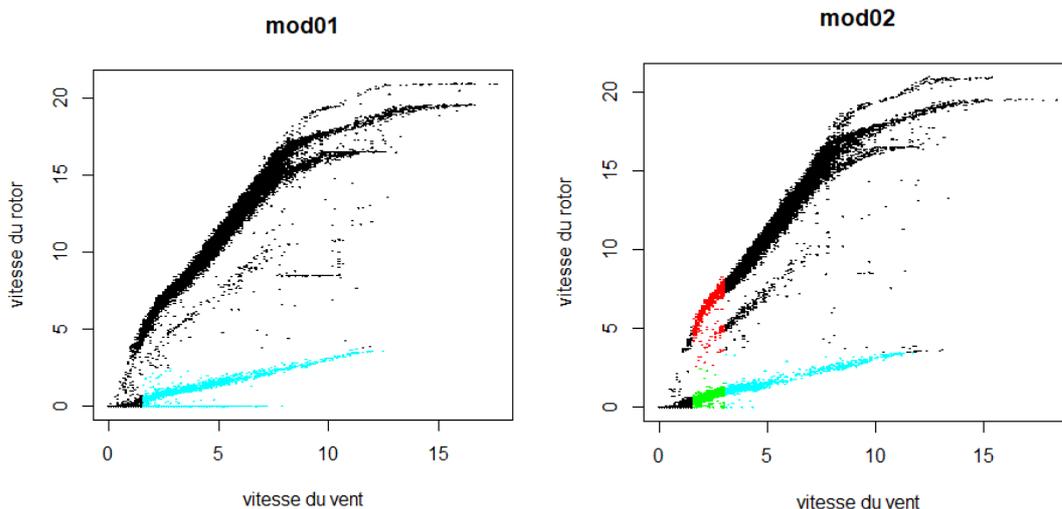
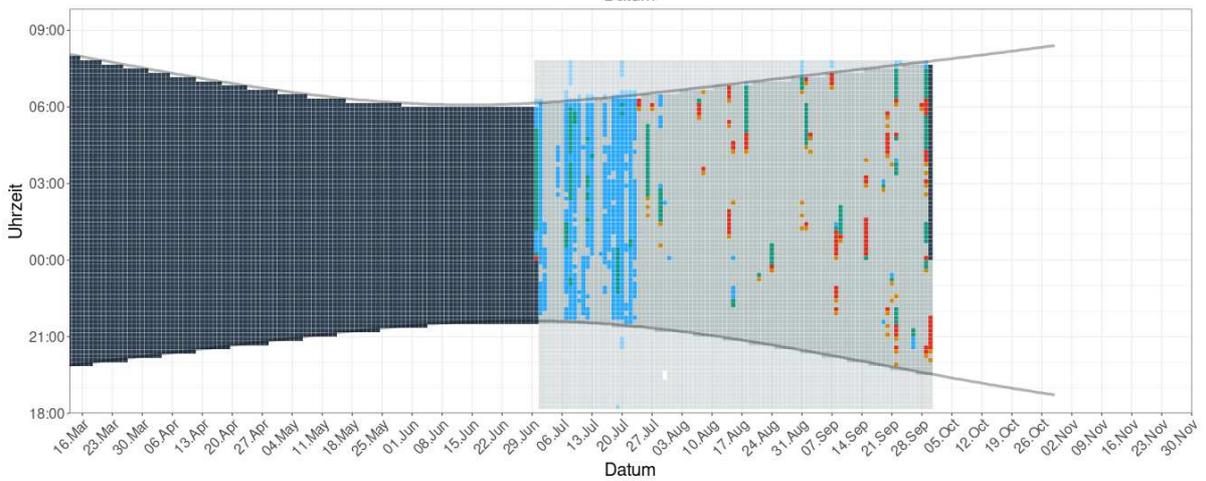
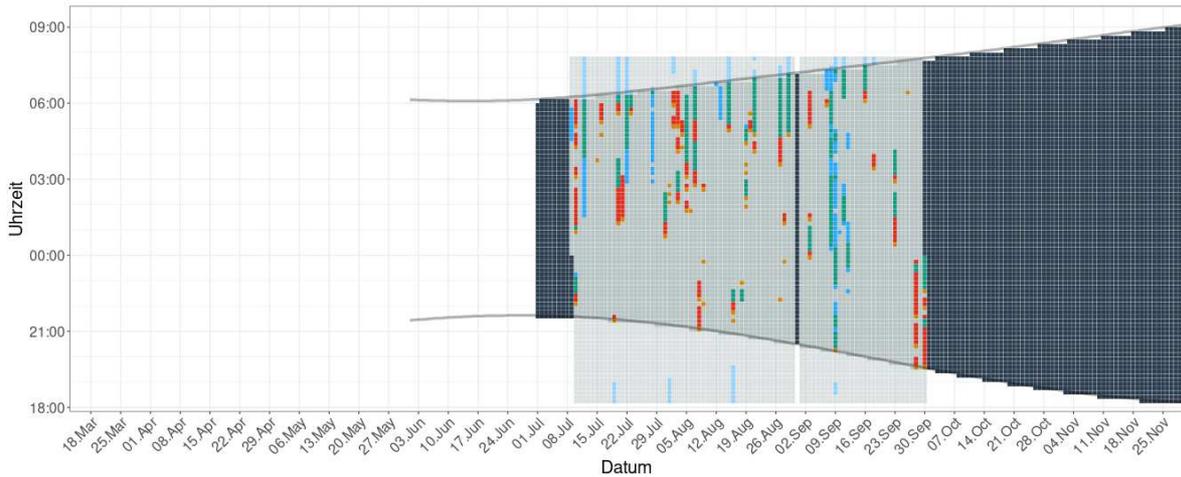
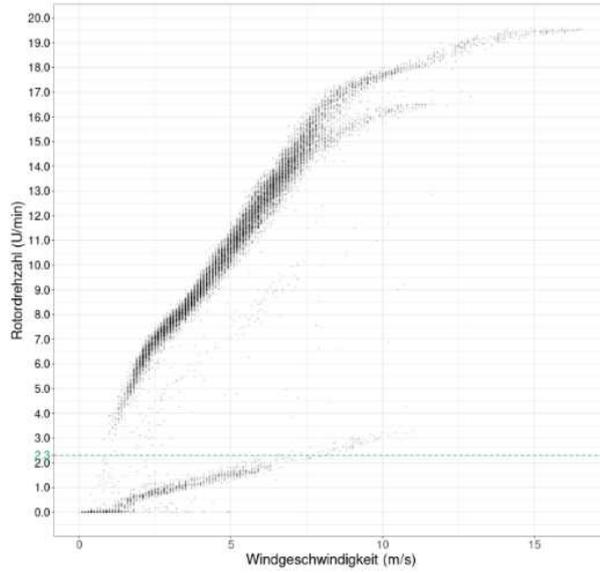


Figure 1. Vitesse du rotor en fonction de la vitesse de vent pour les modalités 1 et 2 : positions des différentes classes décrites Table 1

Sorties graphiques du logiciel Probat Inspector

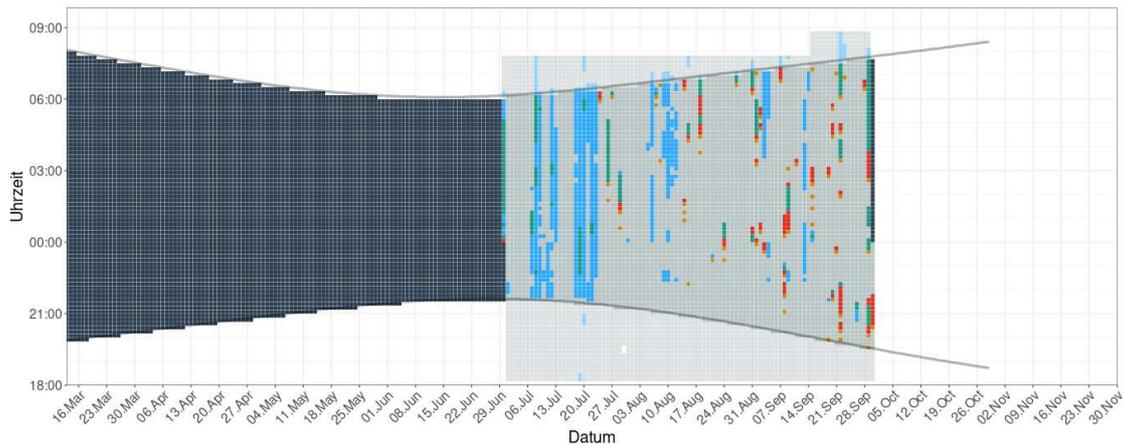
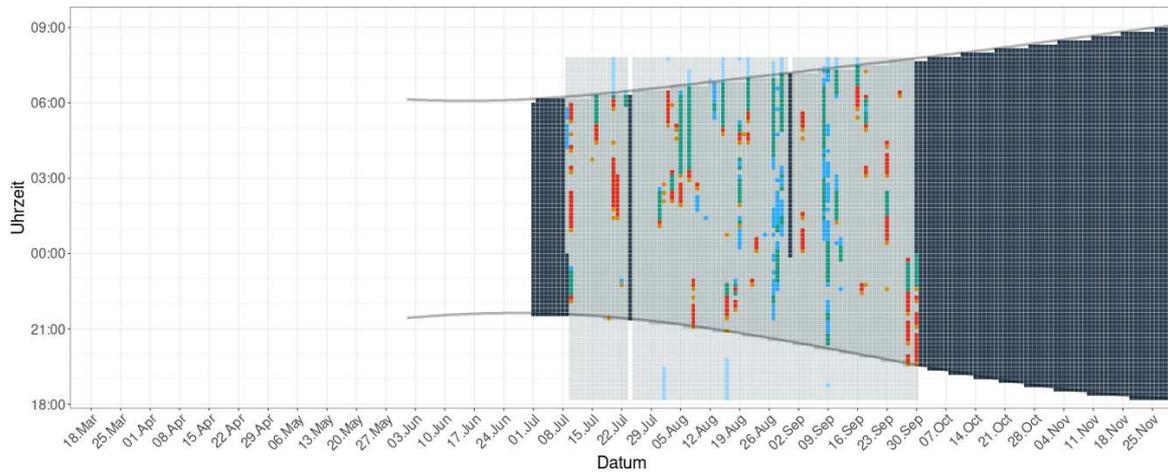
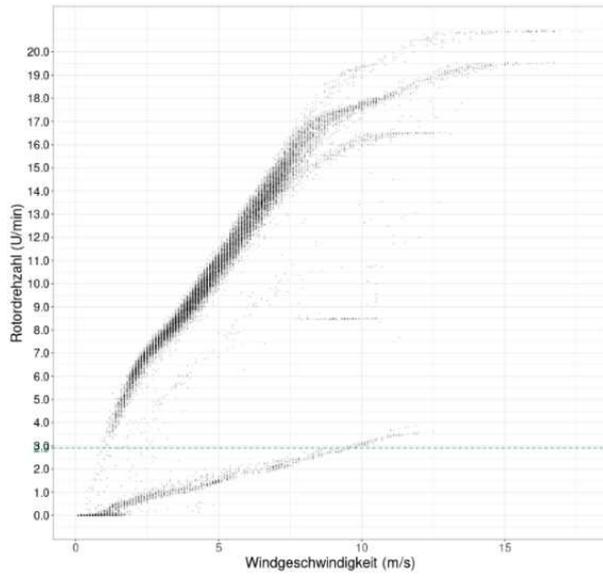
Mod01 (no regulation expected) (cut-in speed considered: wind <2)

Lot 1



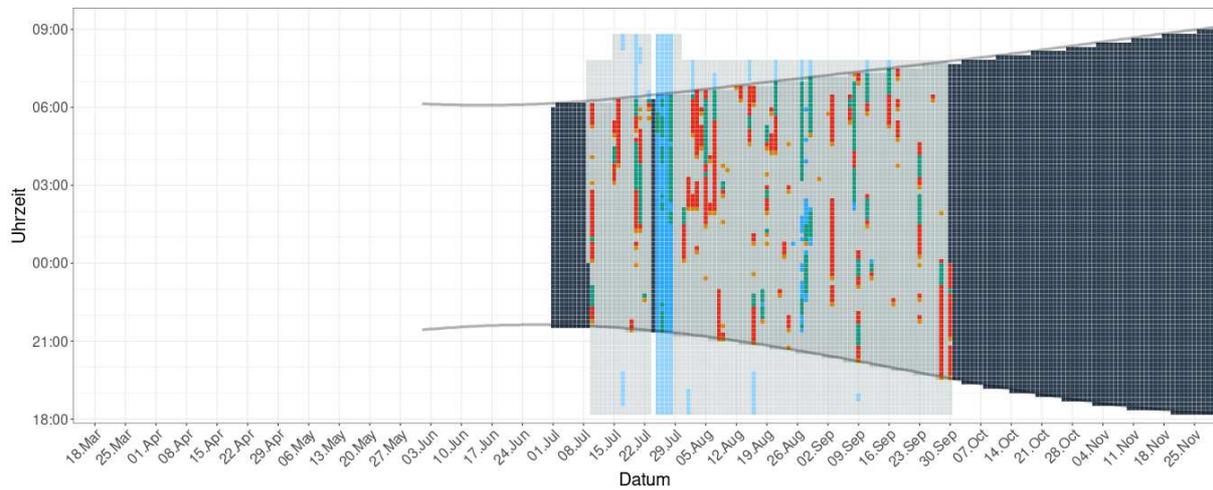
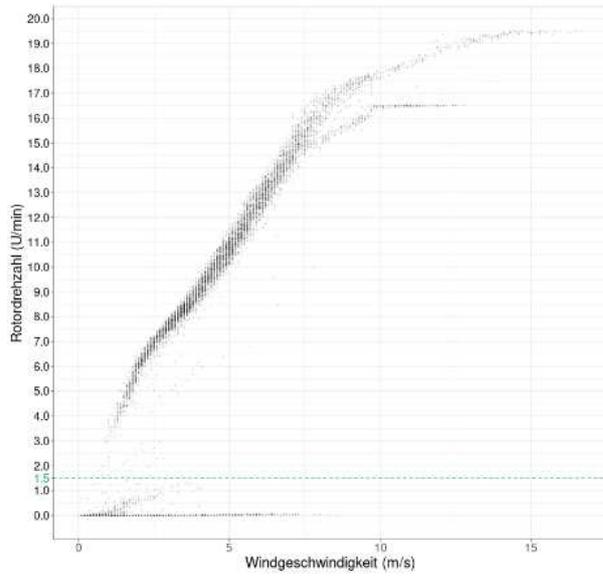
Betriebsstatus	korrekte Abschaltung / Stillstand	nicht erfolgte Abschaltung	Abschaltung muss initiiert werden	Betrieb erlaubt, Status unbekannt
außer Betrieb				
			Dokumentationlücke, Überprüfung nicht möglich	

Lot 2



Betriebsstatus		Abschaltung muss initiiert werden		Betrieb erlaubt, Status unbekannt	
■	korrekte Abschaltung / Stillstand	■	Abschaltung muss initiiert werden	■	Betrieb erlaubt, Status unbekannt
■	außer Betrieb	■	Dokumentationslücke, Überprüfung nicht möglich	■	
■		■		■	
■		■		■	

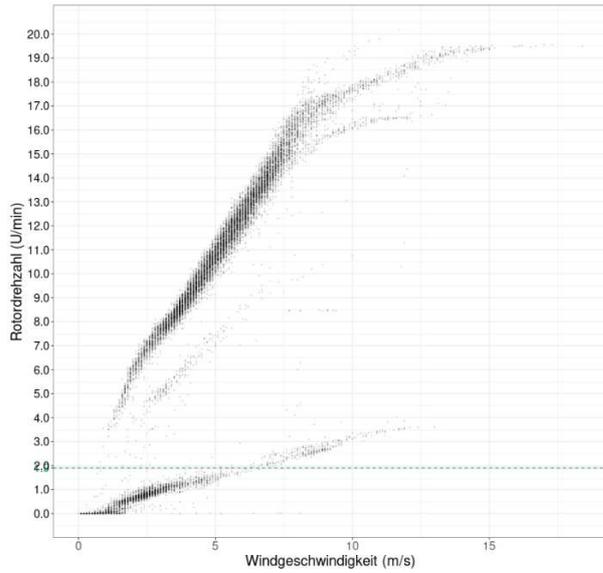
Lot3



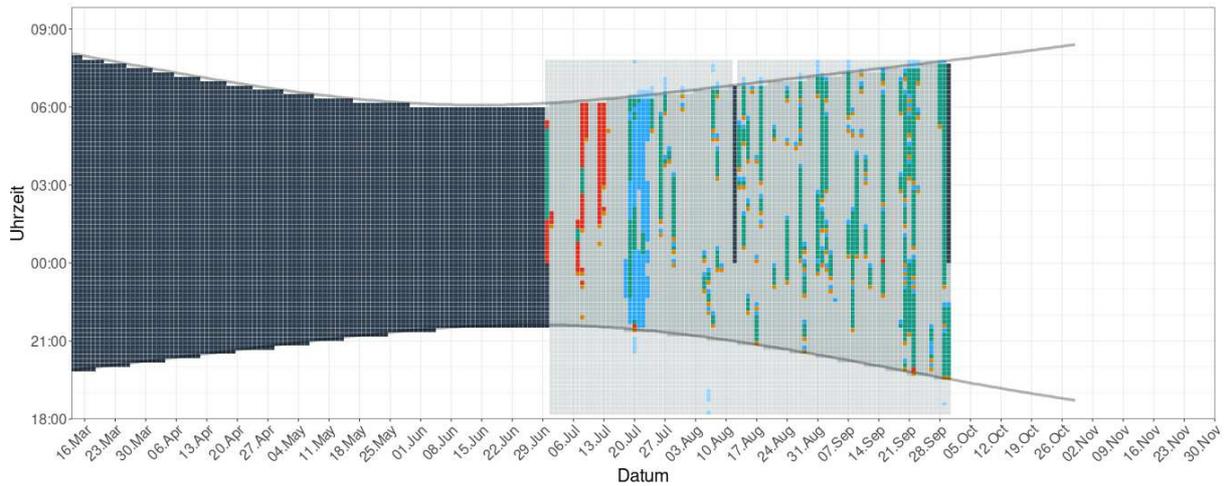
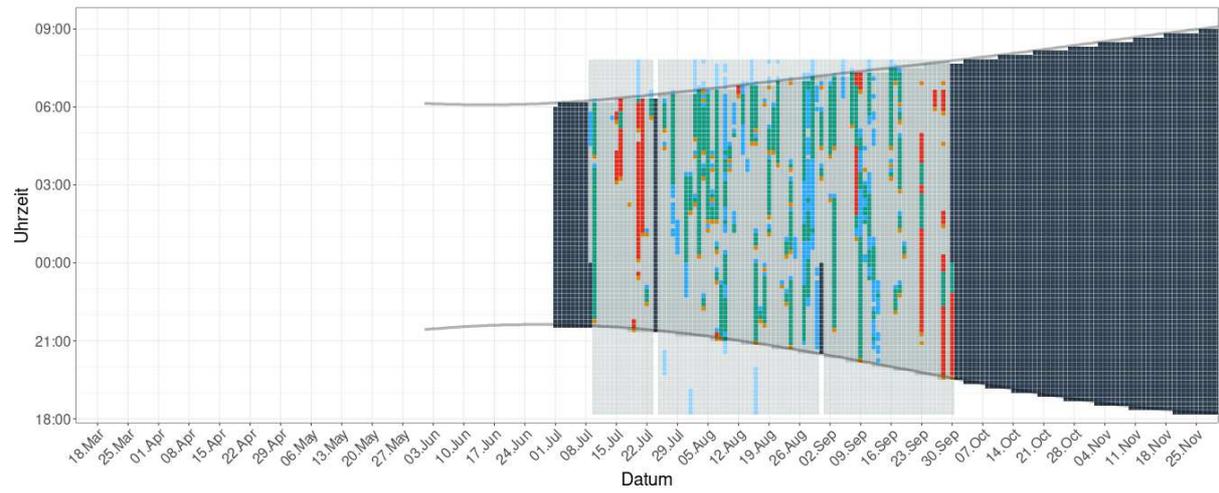
Betriebsstatus	korrekte Abschaltung / Stillstand	nicht erfolgte Abschaltung	Abschaltung muss initiiert werden	Betrieb erlaubt, Status unbekannt
	außer Betrieb	Normalbetrieb	Dokumentationslücke, Überprüfung nicht möglich	

Mod 2 (Wind < 3)

Lot 4

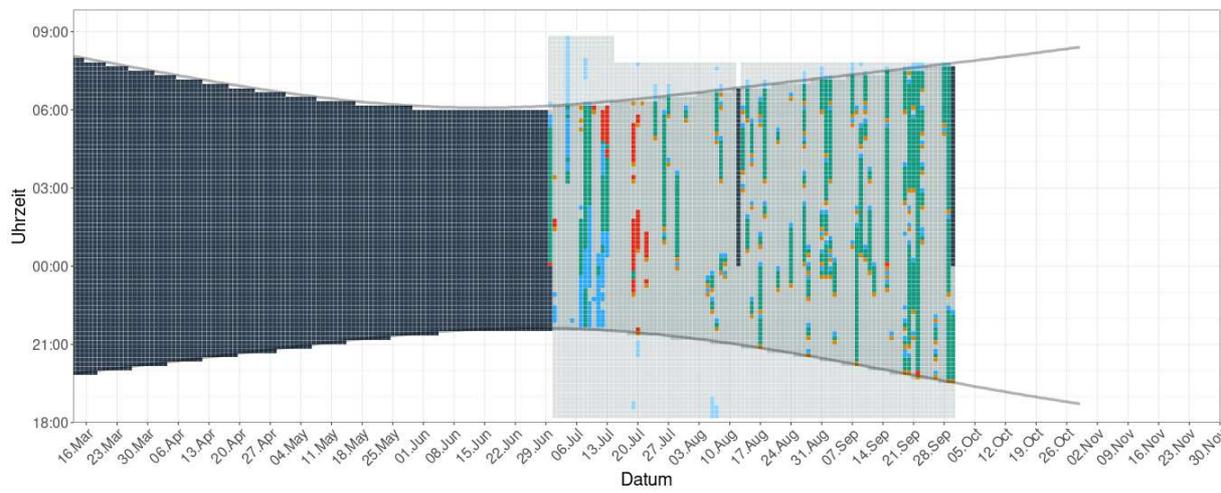
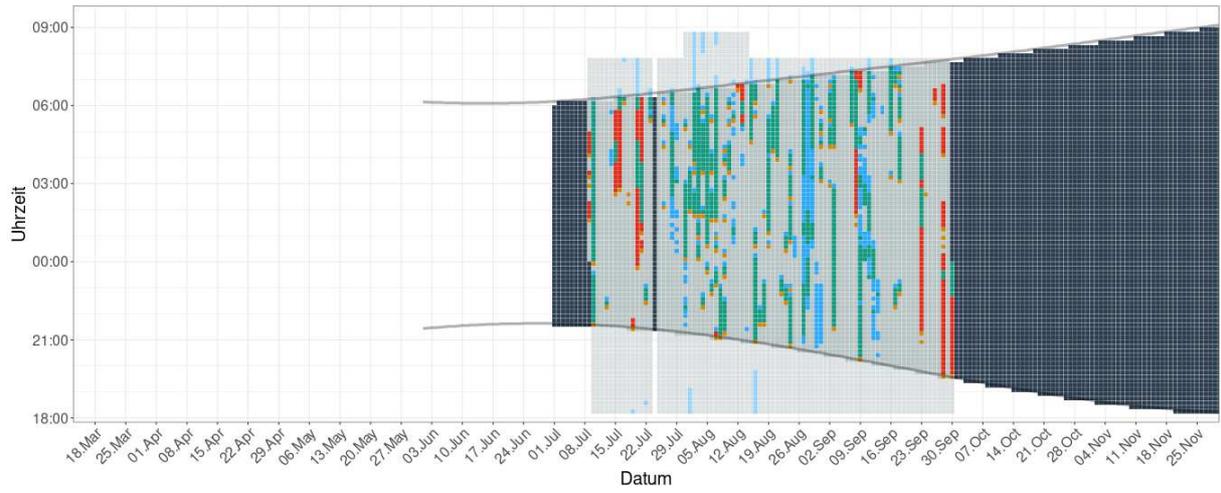


-> too imprecise threshold value



Betriebsstatus	korrekte Abschaltung / Stillstand	nicht erfolgte Abschaltung	Abschaltung muss initiiert werden	Betrieb erlaubt, Status unbekannt
außer Betrieb	Normalbetrieb	Dokumentationslücke, Überprüfung nicht möglich		

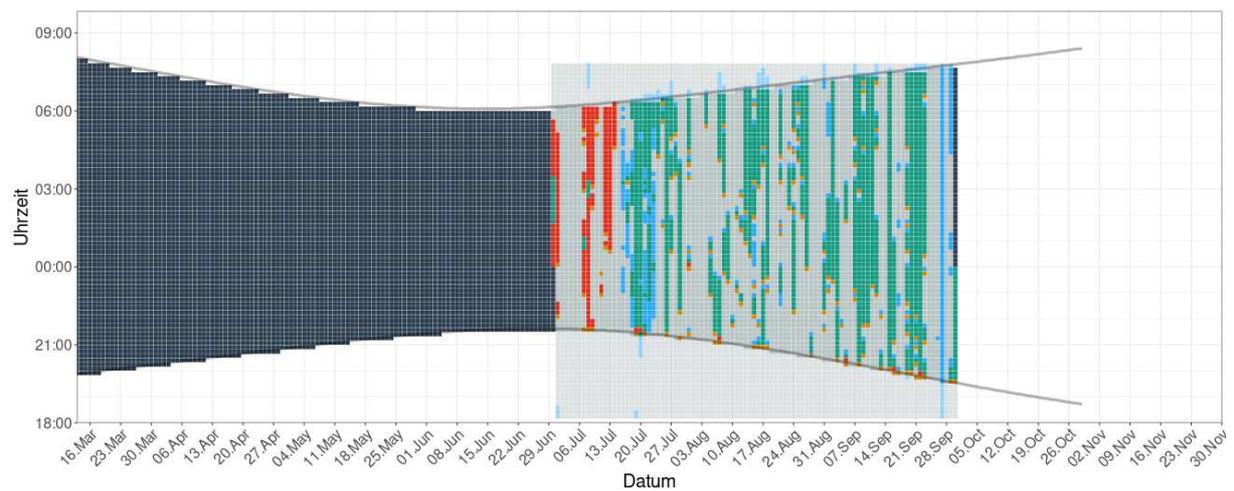
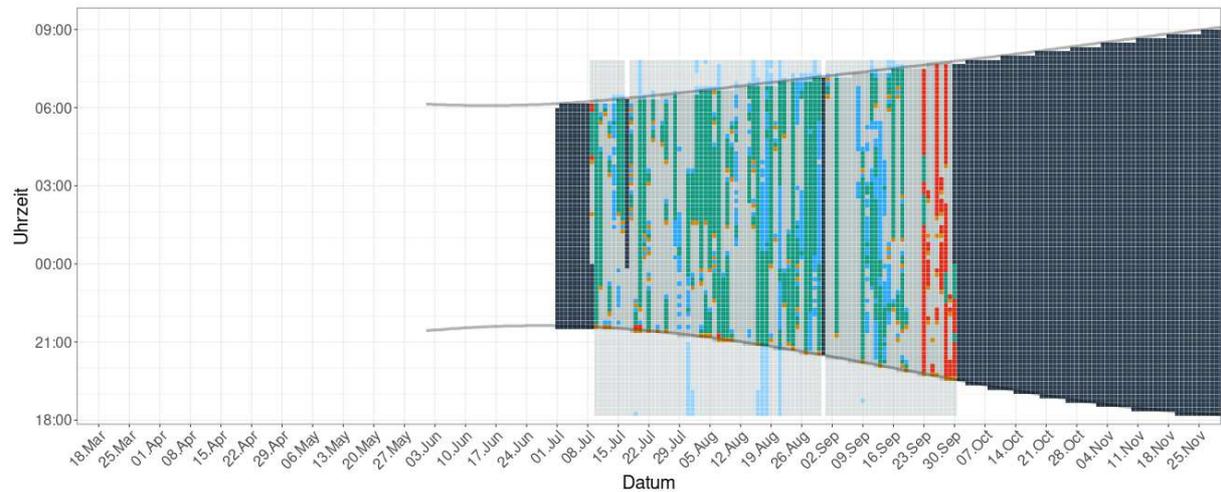
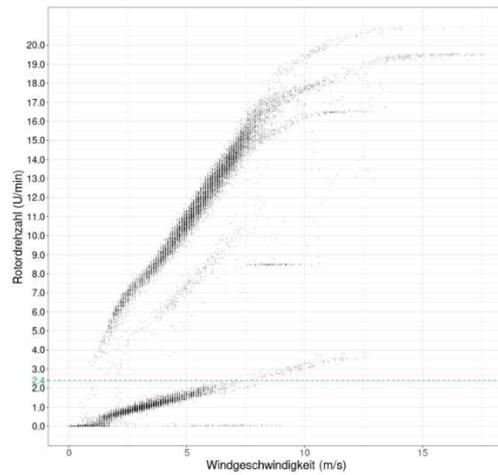
Lot 5



Betriebsstatus	korrekte Abschaltung / Stillstand	nicht erfolgte Abschaltung	Abschaltung muss initiiert werden	Betrieb erlaubt, Status unbekannt
außer Betrieb				
Normalbetrieb				
Dokumentationslücke, Überprüfung nicht möglich				

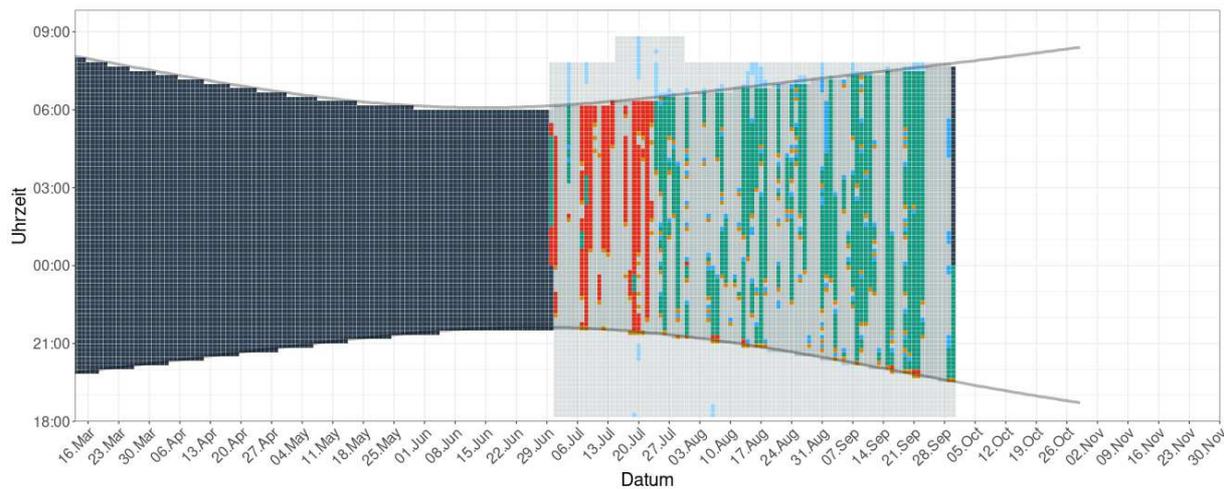
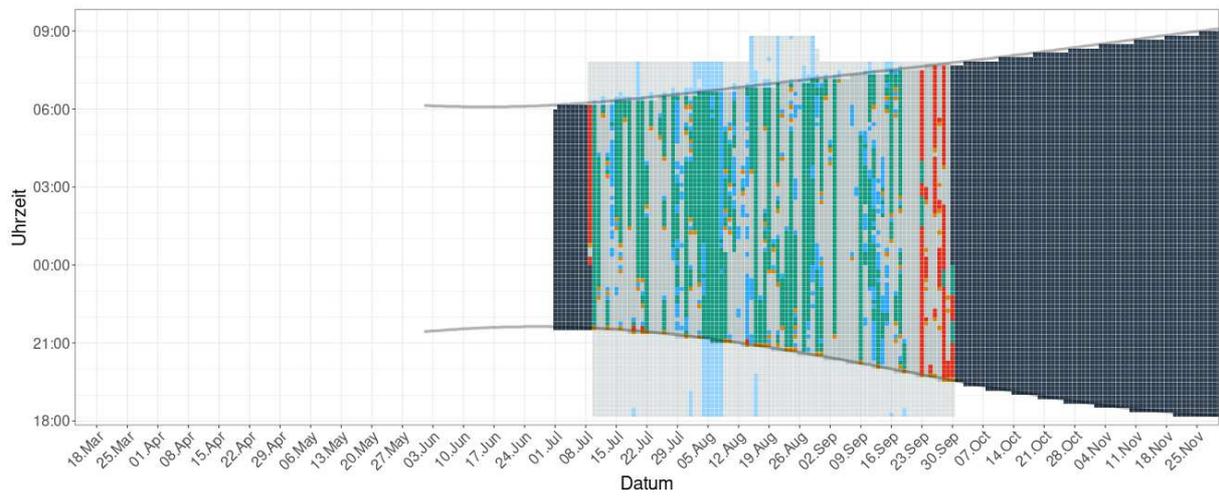
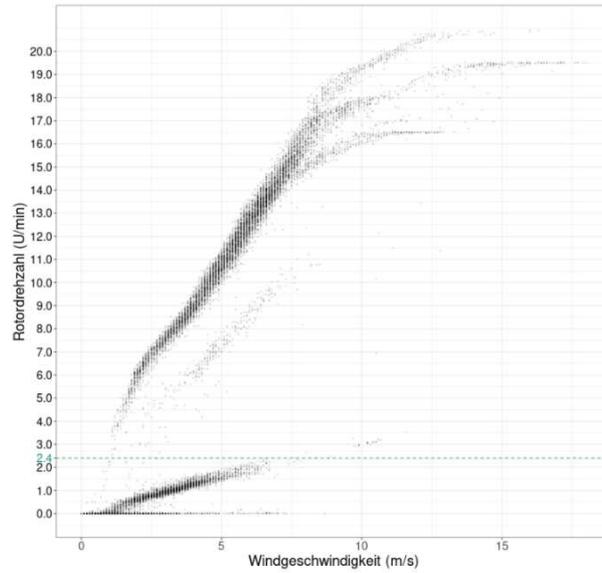
Modalité 3 (Wind < 4.5 & Temp > 10)

Lot 6



Betriebsstatus		Betriebsstatus		Betriebsstatus	
■	korrekte Abschaltung / Stillstand	■	nicht erfolgte Abschaltung	■	Abschaltung muss initiiert werden
■	außer Betrieb	■	Normalbetrieb	■	Dokumentationslücke, Überprüfung nicht möglich
				■	Betrieb erlaubt, Status unbekannt

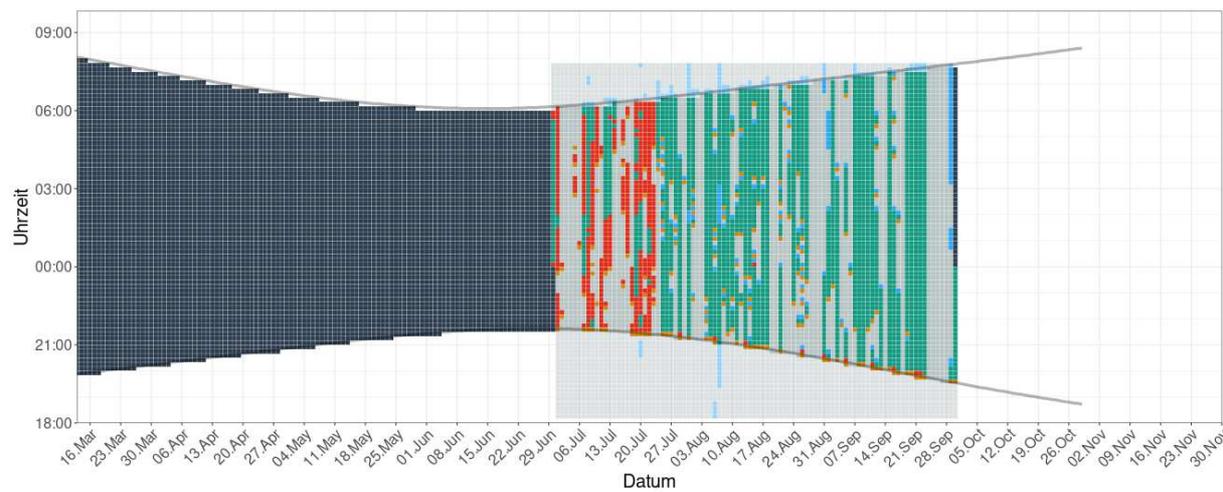
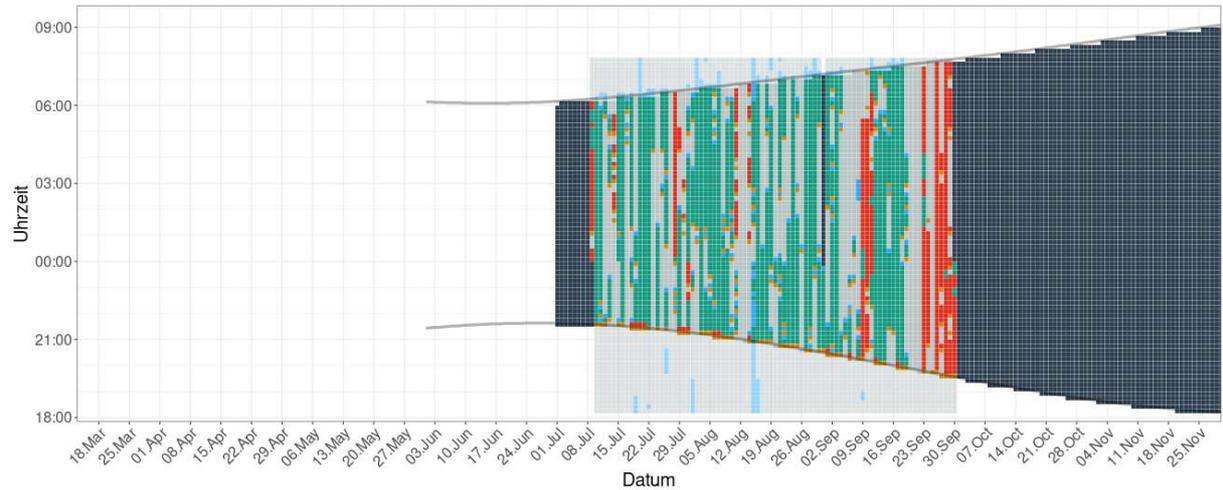
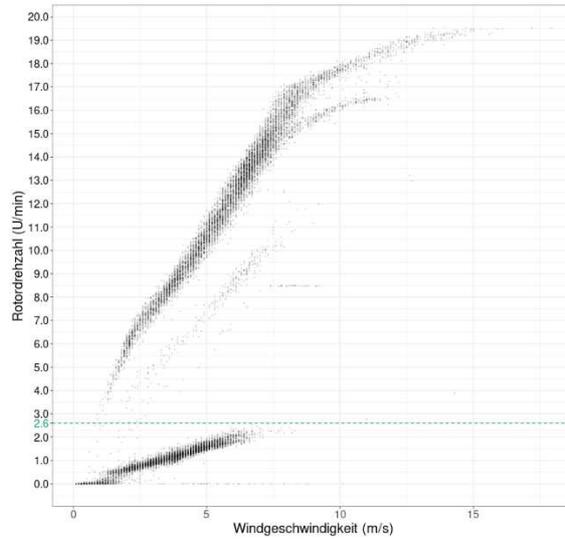
Lot 7



Betriebsstatus	korrekte Abschaltung / Stillstand	nicht erfolgte Abschaltung	Abschaltung muss initiiert werden	Betrieb erlaubt, Status unbekannt
außer Betrieb	Normalbetrieb		Dokumentationslücke, Überprüfung nicht möglich	

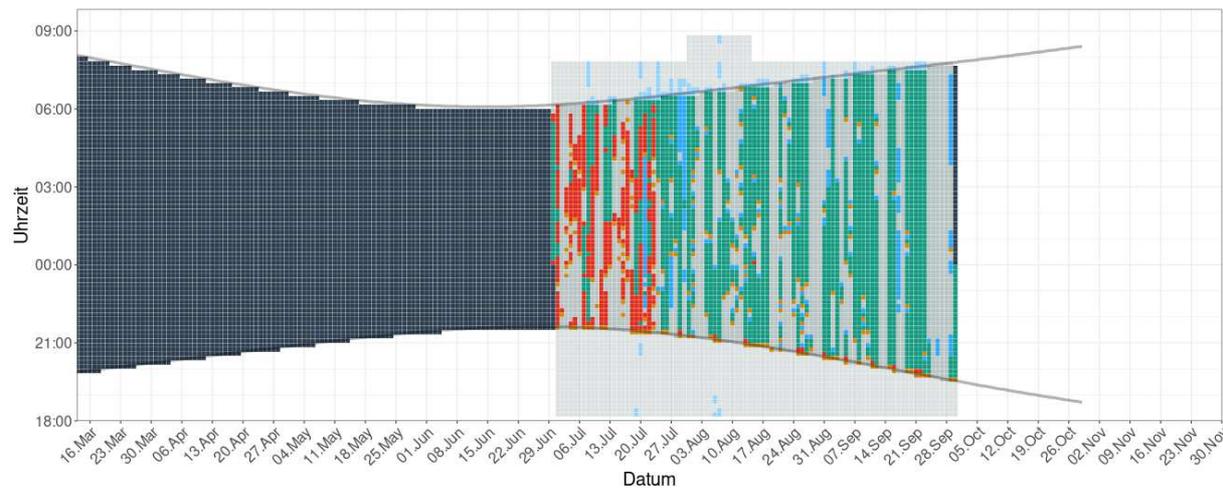
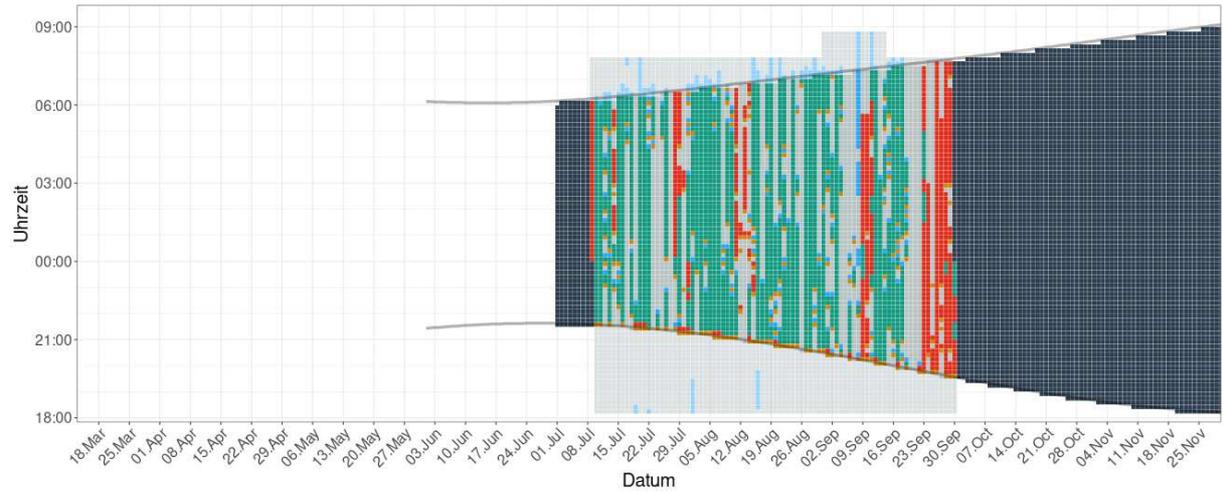
Modalité 4 (Wind < 6 ; Temp > 10)

Lot 9



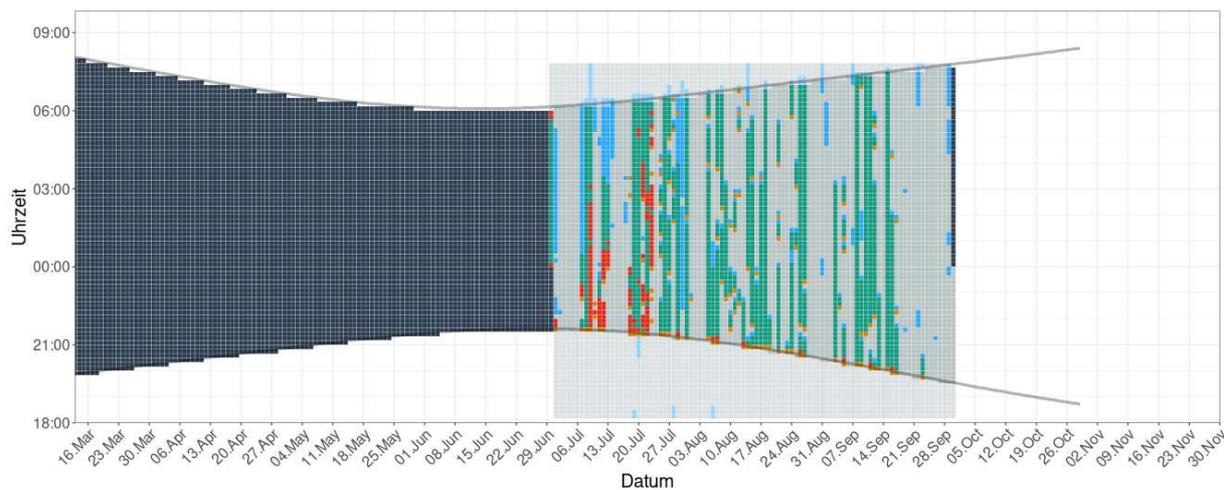
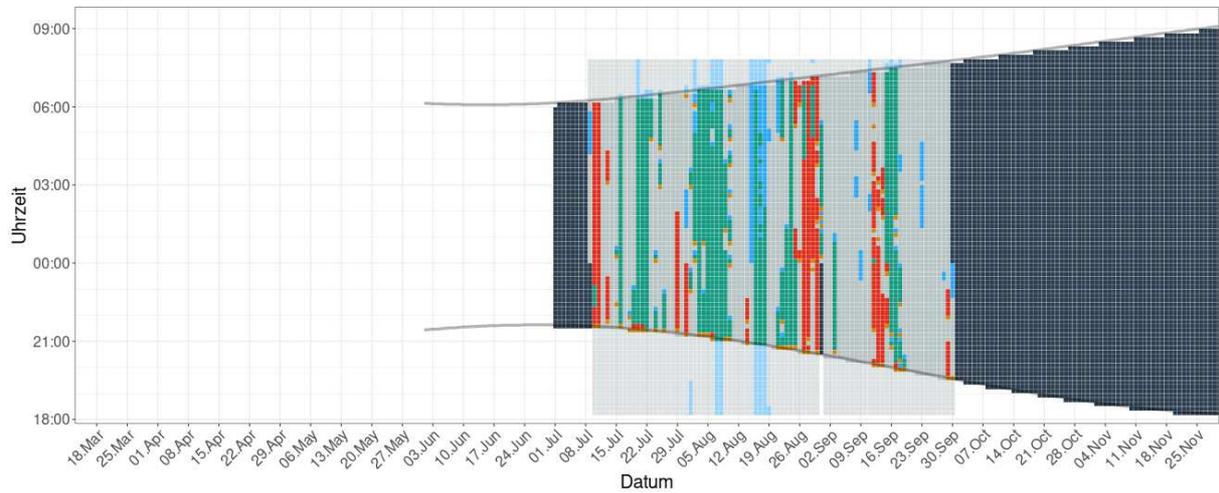
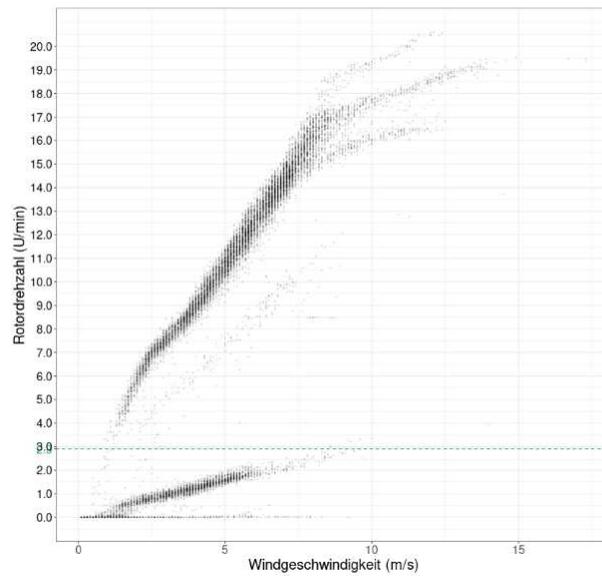
Betriebsstatus	korrekte Abschaltung / Stillstand	nicht erfolgte Abschaltung	Abschaltung muss initiiert werden	Betrieb erlaubt, Status unbekannt
außer Betrieb			Dokumentationslücke, Überprüfung nicht möglich	
		Normalbetrieb		

Lot 10



Betriebsstatus	korrekte Abschaltung / Stillstand	nicht erfolgte Abschaltung	Abschaltung muss initiiert werden	Betrieb erlaubt, Status unbekannt
außer Betrieb				
Normalbetrieb				
Dokumentationslücke, Überprüfung nicht möglich				

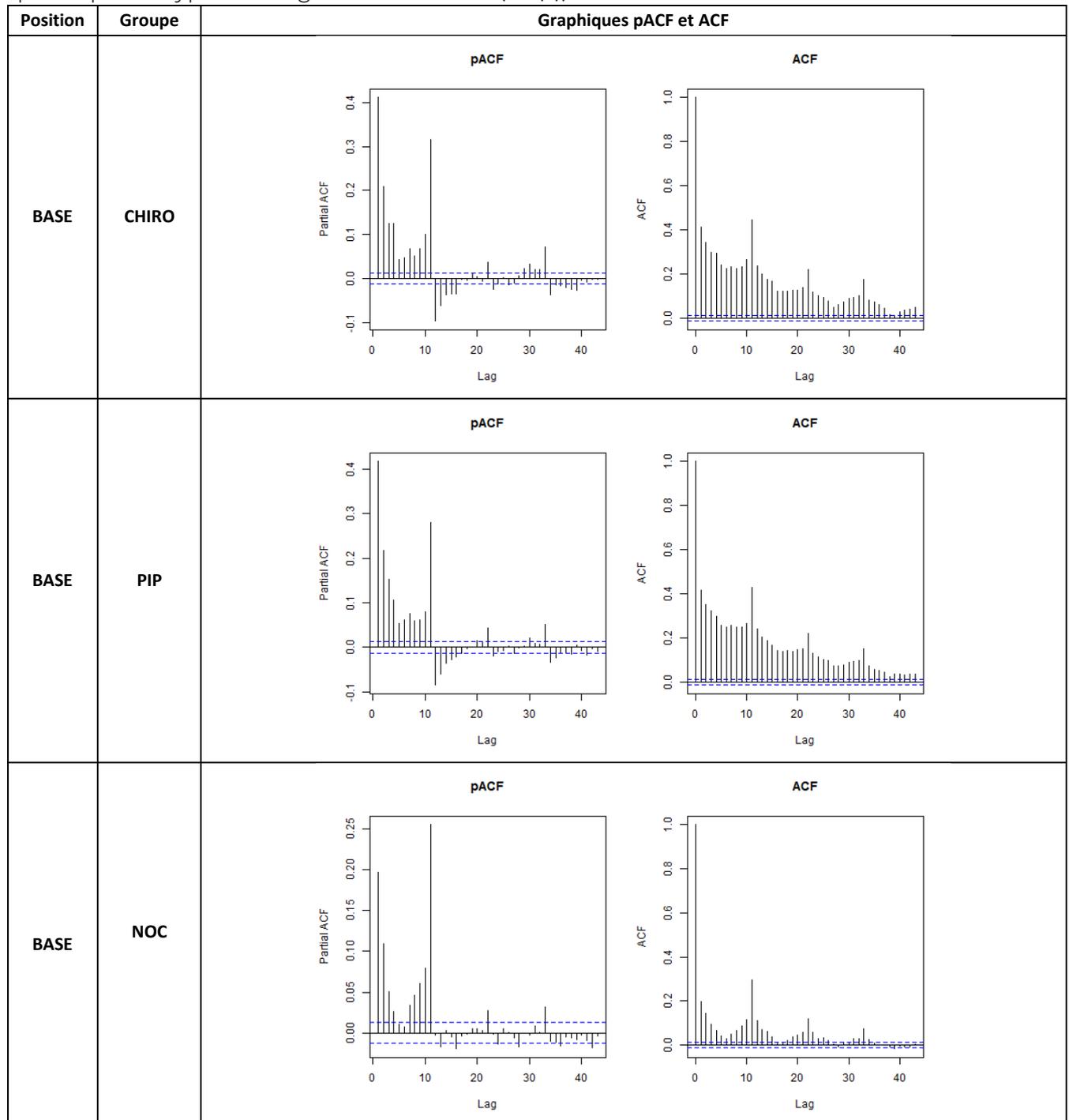
Modalité 5 (Wind < 6 ; Temp > 5)



Betriebsstatus	korrekte Abschaltung / Stillstand	nicht erfolgte Abschaltung	Abschaltung muss initiiert werden	Betrieb erlaubt, Status unbekannt
außer Betrieb				
				Dokumentationslücke, Überprüfung nicht möglich
				Normalbetrieb

Annexe 12. Contrôle de l'autocorrélation spatiale – GAMM (résolution horaire) (volet2)

Figure 1. Graphiques pACF et ACF après intégration d'une structure de corrélation spécifique de type autorégressive d'ordre 1 (AR(1)) lors de la calibration des modèles.



<p>NACELLE</p>	<p>CHIRO</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>pACF</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>ACF</p> </div> </div>
<p>NACELLE</p>	<p>PIP</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>pACF</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>ACF</p> </div> </div>
<p>NACELLE</p>	<p>NOC</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>pACF</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>ACF</p> </div> </div>

Annexe 13. Questionnaire utilisé lors des interviews des services de l'état et liste des personnes interviewées (volet 1)

Questionnaire Services de l'Etat

<u>Date de l'enquête</u>	
<u>Nom Prénom</u>	
<u>Organisme</u>	
<u>Fonction</u>	
<u>Enquêteur</u>	

Souhaitez-vous que les données concernant votre identité soient rendues confidentielles dans le cadre de cette étude ?

Généralités

- Présentation de la personne interrogée et son expérience / rapport avec l'éolien et la régulation chiro

A quelle phase du processus de régulation la personne ou son organisme interviennent-ils ?

		Phase projet (étude)	Phase exploitation (suivi parc existant)
1 / Conception de la mesure	1a / Conception proposition du dimensionnement de la mesure		
	1 b/ Négociation, validation, optimisation de la mesure	X	X
2 / Mise en oeuvre de la mesure	2a / Ordre de mise en oeuvre, communication		X
	2b/ Implémentation au niveau des éoliennes		
3 / Suivi d'efficacité et optimisation	3a/ Suivi d'efficacité (suivi environnemental, activité, mortalité) et optimisation		
	3b / Validation, négociation, optimisation de la mesure, mesure corrective		X

- Depuis quelle année êtes-vous confronté aux mesures de régulation en faveur des chiroptères ? Est-ce que ces mesures ont évolué avec le temps et comment ?

Année :

Evolution dans le temps : Diminution des seuils, Stable, Augmentation des seuils, Généralisation à de nombreux parcs éoliens, prise en compte de nouveaux paramètres

- Sur une échelle de 1 à 10, quelle est l'importance de l'enjeu chiroptère parmi les autres enjeux pour un dossier (projet éolien ou un parc en exploitation) ?
- Aujourd'hui, est-ce que la mesure de régulation est systématique ou bien est-ce qu'il y a d'autres mesures mises en place en priorité ?

Oui, Non, Autres mesures prioritaires : éloignement des haies, modèle d'éolienne, entretien des plateformes, éclairage

- A quel pourcentage estimez-vous le nombre de projets pour lequel une mesure de régulation est préconisée ?

%

- Et sur les parcs en activité, est-ce que tous les parcs (sauf les plus récents) ont fait l'objet d'un suivi post-implantation ?

Oui, Non (si non, précisez le pourcentage de parcs non suivis)

- Et quel pourcentage font l'objet d'une mesure de régulation en phase d'exploitation ?

%

Concernant le processus de conception de la mesure de régulation ?

- Quels sont les critères pris en compte par vos services pour évaluer l'enjeu chiroptère au niveau du site ?

(Caractéristiques du parc, activité en hauteur, activité au sol, effets cumulés, état des populations locales, autres critères)

Est-ce que les effets cumulés des parcs préexistants et en projet sont pris en compte pour surélever le seuil et garantir une efficacité conservatoire ?

oui non

Est-ce que l'état des populations locales est pris en compte dans le choix des seuils ?

oui non uniquement par rapport à la patrimonialité régionale.

Concernant le dimensionnement de la mesure prédictive, un suivi continu en hauteur est-il un prérequis obligatoire ?

oui non

D'autres critères sont-ils utilisés pour majorer ou minorer les niveaux de régulation ?

oui non

Si oui, s'agit-il de : la garde au sol défaut de données initiales

Emplacement du parc autre

- Lorsque vous recevez le rapport du BE ou de l'association, que se passe-t-il ? (Utilisez-vous souvent les rapports comme base de dimensionnement des mesures ? Dans quels cas utilisez-vous vos propres référentiels pour proposer une mesure de régulation ?)

- A quelle fréquence modifiez-vous les mesures proposées par les BE / assos ?

Jamais Entre 1 et 25% Entre 25 et 50 % Entre 50 et 75% Entre 75 et 100 %

- Et dans quel sens ?

Protection des chiroptères Production d'énergie (est-ce que c'est parfois revu à la baisse ?)

Vos services imposent-ils la mise en place de mesures de régulation de leur propre initiative ? Selon quelle fréquence ?

Jamais Entre 1 et 25% Entre 25 et 50 % Entre 50 et 75% Entre 75 et 100 %

Si oui, y-a t-il un pattern "type" de régulation applicable ?

- Quel type de régulation est le plus souvent mis en place dans la région

(Conventionnel, prédictif, en temps réel ?).

- Quels paramètres sont pris en compte ?

Température Vitesse de vent Heures Saisons

Pluviométrie Pression atmosphérique Autre...

- Y-a-t-il des spécificités régionales ?

Oui, Non, si oui, lesquelles (espèces à enjeux, fréquentation chiro en fonction des saisons)

- A quelle fréquence y a t-il des négociations de la mesure avec l'exploitant ?

Jamais

Entre 1 et 25%

Entre 25 et 50 %

Entre 50 et 75%

Entre 75 et 100 %

- Quels rôles ont vos services dans la mise en œuvre de la régulation chiro ?

Emission d'un ordre de mise en œuvre, transfert d'un avis à la préfecture...

- Comment communiquez-vous votre décision et à qui ? Est-ce un ordre ou un avis ?
- Est-ce qu'un arrêté préfectoral est émis à chaque fois qu'une régulation est prescrite ?
Oui, Non

Suivi d'efficacité et d'optimisation de la mesure

- Participez-vous au suivi de la mise en place de la mesure ? Et de son efficacité ?
Oui, Non, et si oui, comment : inspection, envoi de données de l'exploitant
- Par qui se fait l'inspection / le contrôle de la mesure de régulation ? Par des inspecteurs ICPE ? Par d'autres personnes ?
- A quelle fréquence se font ces inspections ?
- Est-ce qu'il y a d'autres moyens mis en place ou envisagés pour suivre l'efficacité de la mesure ?

Suivi en direct, etc

- Que risque un exploitant s'il ne met pas en place la mesure ?

Questions plus larges / REX

- Y-a-t-il des communications entre services de l'Etat à différentes échelles par rapport à la thématique chiroptères dans l'éolien ?
- A votre avis, quelles sont les choses à améliorer dans le processus ?
- Quelles sont celles que vous trouvez positives, bien mises en place à votre échelle ?
- Est-ce que le dialogue entre les différents acteurs est suffisant ?

Pouvez-vous nous aider à accéder aux arrêtés préfectoraux concernant votre région qui sont indisponibles en ligne ?

Liste des personnes interviewées Services de l'Etat

Date de l'interview	Organisme	Nom Prénom de personne interviewée	Fonction
26/07/2021	DREAL Hauts-de-France	HETZEL Jeremy	Chargé de mission Qualité et Connaissance Service Eau et Nature
29/07/2021	Office Français de la Biodiversité (OFB)	DE BILLY Véronique	Coordinatrice « Energies renouvelables et Biodiversité »
22/09/2021	DREAL Centre-Val-de-Loire	LESAUX Yvonnick	Service Eau, Biodiversité, Risques Naturels et Loire
30/09/2021	DEAL Guadeloupe	GESSNER Marion	Chargée de mission Pôle Biodiversité/Service Ressources naturelles
08/10/2021	DREAL Bretagne	HEYVANG Isabelle PAILLETTE Valentin	Référente Éolien et Carrières Service Prévention des Pollutions et des Risques Chargé de mission Espèces-Biodiversité-Milieu marin, Service Patrimoine Naturel
01/12/2021	DREAL Grand-Est	SAINTIER Rémi	Adjoint au chef de pôle espèces et expertise naturaliste Service eau, biodiversité, paysages
03/12/2021	DREAL Occitanie	ARENALES-DEL-COMPO Vincent	Chargé de mission Espèces Protégées, Direction Ecologie

Questionnaire bureaux d'études / associations

<u>Date de l'enquête</u>	
<u>Nom Prénom</u>	
<u>Organisme</u>	
<u>Fonction</u>	
<u>Enquêteur</u>	

Souhaitez-vous que les données concernant votre identité soient rendues confidentielles dans le cadre de cette étude ?

Généralités

- Présentation de la personne interrogée et son expérience / rapport avec l'éolien et la régulation chiro

A quelle phase du processus de régulation la personne ou son organisme interviennent-ils ?

		Phase projet (étude)	Phase exploitation (suivi parc existant)
1 / Conception de la mesure	1a / Conception proposition du dimensionnement de la mesure	X	X
	1 b/ Négociation, validation, optimisation de la mesure	X	X
2 / Mise en œuvre de la mesure	2a / Ordre de mise en oeuvre, communication		
	2b/ Implémentation au niveau des éoliennes		
3 / Suivi d'efficacité et optimisation	3a/ Suivi d'efficacité (suivi environnemental, activité, mortalité) et optimisation		X
	3b / Validation, négociation, optimisation de la mesure, mesure corrective		X

- Depuis quelle année êtes-vous confronté aux mesures de régulation en faveur des chiroptères ? Est-ce que ces mesures ont évolué avec le temps et comment ?

Année :

Evolution dans le temps : Diminution des seuils, Stable, Augmentation des seuils, Généralisation à de nombreux parcs, Prise en compte de nouveaux paramètres

- Sur une échelle de 1 à 10, quelle est l'importance de l'enjeu chiroptère parmi les autres enjeux pour un dossier (projet éolien ou un parc en exploitation) ?

Phase de conception de mesure de régulation

- Pouvez-vous effectuer une description rapide libre de votre méthode de conception de la mesure de régulation ?
- Actuellement, avec quelle intensité êtes-vous confronté à la régulation des éoliennes en faveur des chiroptères ? (phase de projet et exploitation)

Pourcentage :

Phase de recueil des données :

- Quel matériel et type de suivi utilisez-vous pour le suivi ACTIF ?

Suivi:

Point d'écoute, Transect, Nous ne réalisons pas de suivi actif, autre (détail)

Matériel:

D240X, autre

- De même pour le suivi PASSIF quel matériel et méthodes utilisez-vous ?

Suivi:

En continu Ponctuel Sur mât de mesure En nacelle En canopée Au sol Nous ne
réalisons pas de suivi passif Autre

Matériel:

SMBat Batcorder BatmodeBatlogger Anabat Autre :

Si suivi en hauteur :

- A quelle(s) hauteur(s) sont généralement installés les enregistreurs en continu ?

Chiffre/Fourchette:

- Est-ce que toutes les plages de fréquence sont enregistrées ?

Oui Non

- Les différents types de milieux du site sont-ils échantillonnés ?

Oui Non

- Généralement, sur combien de temps se déroule le suivi et est-ce suffisant pour dimensionner un pattern ?

Une seule année Plusieurs années Trois périodes d'activité des chiros Pendant la migration Autre

Suffisant:

Oui Non

- Quelle est la pression d'échantillonnage visée ?

En continu ; Echantillonnage temporel ; autre

- Quelle est l'unité de mesure de l'activité par les enregistreurs ?

Nombre de contacts / heure 1 contact toutes les x secondes Autre

- Qui est-en charge de l'installation et de la maintenance du matériel ?

Salariés internes Sous-traitants Autre

- Généralement, quelle est la réactivité d'intervention en cas de problème ?

Le jour même Dans les trois jours Dans la semaine Sous deux semaines Deux semaines
ou plus

- Sur une année, quel pourcentage de suivis ont rencontré un problème technique pour l'enregistreur passif ? Cela a occasionné une perte de données sur quel pourcentage de suivi ?

Pourcentage de pb techniques:

Pourcentage de suivis avec pertes de données:

Problèmes fréquents:

Problème de foudre Suivi incomplet (pb technique) Visite non effectué (oubli) Autre

- L'objectif du suivi est-il généralement atteint ?

Suivi actif:

Très rarement ou jamais Parfois Souvent La plupart du temps Tout le temps

Suivi passif :

Très rarement ou jamais Parfois Souvent La plupart du temps Tout le temps

- **Concernant la méthode d'analyse des données, comment sont analysés les contacts et quelle est l'unité utilisée ?**

Analyse :

Un par un Echantillonnage Autre

Unité :

Contacts Contacts 5s Barataud Minute positive Temps d'activité par espèce Autre

- **En termes d'analyse des modalités de fréquentation, quelles représentations utilisez-vous ?**

Histogramme d'activité Graphique des durées de nuit Graphique des vitesses de vent
Autre

- **Quels référentiels d'activité utilisez-vous pour les analyses quantitatives ?**

Vigie-Chiro Créé en interne Autre

- **Comment détaillez-vous l'approche qualitative ?**

Par espèces Par saison En nombre de contacts par heure / nuit / espèce

Méthode de choix du dimensionnement du pattern :

- **Quel est le référentiel de départ ?**

Connaissances des spécificités régionales Etat initial Etudes ultérieures Continuité interannuelle Autre

- **Pour la dimension du pattern, quels paramètres prenez-vous en compte ?**

Niveau et heures d'activité, Seuil de vent/vitesse, activité mensuelle/saisonnnière, fréquentation du site, sensibilité à l'éolien, distance de la lisière, ZH, enjeux des espèces...

- **Effectuez-vous des simulations de l'efficacité du scénario de régulation sur la base de données de référence et avec quel modèle ?**

Oui Non

Modèle :

Paramètres indépendants Combinaisons de paramètres Autre

Présent dans le rapport : Oui Non

- **Quel est le poids des évaluations patrimoniales (Listes Rouges) ?**

Système particulier (de notes par ex) ?

En phase de négociation, de validation et d'optimisation de la mesure ...

- **A quelle fréquence y a-t-il des négociations de la mesure avec l'exploitant et l'administration ?**

Exploitant : Jamais Entre 1 et 25% Entre 25 et 50 % Entre 50 et 75% Entre
75 et 100 %

Administration : Jamais Entre 1 et 25% Entre 25 et 50 % Entre 50 et 75% Entre
75 et 100 %

- **Quels sont les critères qui sont pris en compte dans les discussions pour minorer ou majorer les niveaux de régulation ? Dans quel sens la mesure peut évoluer ?**

Critères :

Effets cumulés Etat des populations locales Garde au sol Défaut de données Autre

Mesure :

Inchangée, revue à la baisse, revue à la hausse

- Est-ce que les estimations de perte de production sont testées ?

Oui Non

- En moyenne quel est le pourcentage de perte occasionné par votre bridage ?

Pourcentage :

En phase d'exploitation (suivi de parc existant), lors de la phase de suivi d'efficacité et d'optimisation de la mesure ...

- Avez-vous un retour des parcs sur la mise en place des mesures ? Dans quel pourcentage ?

Pourcentage :

Si retour, quel moyen utilisez-vous pour attester de la mise en place du scénario de régulation ?

Echanges avec exploitant / turbinier ; données d'activité des éoliennes ; autre

- Avez-vous déjà observé des erreurs de paramétrage de la régulation par rapport aux paramètres validés par l'administration ? Si oui, à quelle fréquence ?

Oui Non Fréquence :

- Y'a-t-il une continuité entre BE/assos qui ont conseillé le pattern et les suivis ultérieurs ?

Oui Non

- Pour quels seuils de mortalité des mesures correctives sont-elles prises et y'a-t-il une concertation avec l'administration ?

Seuils :

Administration : Oui Non

- Selon votre expérience, au bout de combien de temps et de modifications le scénario est-il jugé efficace ?

Scénario initial ; première reprise ; deuxième reprise ; ... ; jamais

Retour d'expérience et améliorations

- Jugez-vous que la régulation des éoliennes est indispensable pour réduire les risques de mortalité de chiroptères ?
- Quelles sont les choses à améliorer dans le processus de dimensionnement et d'efficacité des patterns ?
- Quelles sont les choses à améliorer dans le processus de mise en place de la régulation ? (communication entre les différents acteurs, améliorations matérielles, ...)
- Quelles sont les choses que vous trouvez positives, bien mises en place à votre échelle ?

Fin du questionnaire

Possible de fournir des suivis post-implantation ou un échantillon ?

Liste des personnes interviewées Bureaux d'étude Associations Exploitants éoliens

Date de l'interview	Organisme	Nom Prénom de personne interviewée	Fonction
19/04/2021	Ouest'Am	NORMAND Brice	PDG -Ecologue
19/05/2021	Fédération Energie Eolienne		
30/07/2021	Calidris	BARGUIL Gaëtan	Directeur adjoint
07/10/2021	KJM Conseil	DUPENDANT Amélie	Chargée de projet
09/02/2021	TotalEnergies	ILLAC Pierre	Responsable du Pôle Etudes et Expertises Environnementales (P3E)

Annexe 14. Qualification des analystes impliqués dans **les simulations** différentes méthodes de dimensionnement de la régulation sur le jeu de données expérimentales d'OPRECh

Pour KJM Conseil et la simulation du mode de régulation prédictif basé sur l'outil Probat :

- Simon Ghanem :
 - **Titre** : Docteur en Biologie, écologue, spécialiste des chiroptères
 - **Fonctions** : Directeur d'étude. Coordination des différents projets, validation interne des livrables, vérification des analyses.
 - **Pratique de la profession** : 20 ans d'expérience.
 - **Formations** :
 - Ph.D. Student, Leibniz Institute for Zoo and Wildlife Research
 - Dr. Rer. Nat., Naturwissenschaften, Freie Univ. Berlin
 - Diplom. Biologie, allgemein. Univ. Ulm
- Julia Treitler :
 - **Titre** : Docteur en Biologie, écologue, spécialiste des chiroptères
 - **Fonctions** : Directeur d'étude. Coordination des différents projets, vérification des analyses.
 - **Pratique de la profession** : 9 ans d'expérience.
 - **Formations** :
- Hugo Vanhove :
 - **Titre** : Chef de projet.
 - **Fonctions** : Interlocuteur direct, analyse acoustique et analyse des données de mortalité, rédaction des rapports.
 - **Pratique de la profession** : 3 ans d'expérience.
 - **Formations** :
 - Master Gestion de l'environnement, CAU Kiel (All.)
 - Licence Biologie et écologie des organismes et des populations (Lille 1).

Pour EXEN et la stimulation du mode de régulation prédictif basé sur une approche comportementale :

- **Mathieu Louis :**
 - **Titre :** Ingénieur écologue – chiroptérologue / ornithologue.
 - **Fonctions :** Chargé d'affaires. Référent bioacoustique des chiroptères. Inventaires, analyses, rédaction et coordination d'expertises chiroptérologiques.
 - **Pratique de la profession :** 12 ans d'expérience.
 - **Formations :**
 - Master II de Gestion et Evolution de la Biodiversité (Université Lille 1) 2011.
 - Niveaux 1 et 2 de bioacoustique des chauves-souris (formé par Y. Tupinier, M. Barataud). 2014, CPIE Pays d'Azay.
- **Frédéric Albespy :**
 - **Titre :** Ingénieur écologue – chiroptérologue.
 - **Fonctions :** Chargé d'affaires. Responsable du pôle chiroptères. Inventaires, analyses, rédaction et coordination d'expertises chiroptérologiques.
 - **Pratique de la profession :** 10 ans d'expérience.
 - **Formations :**
 - Master II de Biostatistiques + Master II de Télédétection ((Univ. Toulouse 3) – 2008-2010 .
 - Niveaux 1 et 2 de bioacoustique des chauves-souris (formé par M. Barataud, T. Disca, Y. Tupinier,). 2011 -2012, CPIE Pays d'Azay.
- **Aurélié Langlois :**
 - **Titre :** Ingénieure écologue – chiroptérologue.
 - **Fonctions :** Chargé d'affaires. Responsable du pôle Suivis ICPE éolien et Co-responsable du pôle chiroptères. Inventaires, analyses, rédaction et coordination d'expertises chiroptérologiques.
 - **Pratique de la profession :** 7 ans d'expérience.
 - **Formations :**
 - Master II Gestion de la biodiversité (Univ. Paul Sabatier Toulouse) – 2016 .
 - Niveaux 1 et 2 de bioacoustique des chauves-souris (formé par M. Barataud, T. Disca, Y. Tupinier,). 2017, CPIE Pays d'Azay.

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1 : Tableau des principaux avantages et contraintes identifiés des différents types de modes de régulation.....	26
Tableau 2 : Sources utilisées pour la création de la base de données nationale des parcs éoliens français faisant l'objet d'une régulation des éoliennes en faveur des chiroptères.....	29
Tableau 3 : Nombre de parcs éoliens et nombre d'éoliennes recensés au niveau national dans la base de données « BDD Taux de régulation national ».....	31
Tableau 4 : Nombre de parcs éoliens par région pour lesquels des documents informatifs (relatifs à des thématiques environnementales) ont été récoltés ou non pour la constitution de la base de données « BDD Taux de régulation national ».....	32
Tableau 5 : Nombre de projets éoliens par région disponibles sur la plateforme projets-environnement.gouv.fr au 15 juillet 2021 et utilisés pour constituer la base de données « BDD Pratiques de la régulation / projets éoliens » et pourcentage associé vis-à-vis du total	33
Tableau 6 Données de la « BDD Pratiques de la régulation » pour les thèmes 1 et 2 présentations du parc et du rapport	36
Tableau 7 Données de la « BDD Pratiques de la régulation » pour le thème 3 : processus de conception initiale de la mesure.....	37
Tableau 8 Données de la « BDD Pratiques de la régulation » pour le thème 4 : caractéristiques de la mesure de régulation (pattern).....	38
Tableau 9 Données de la « BDD Pratiques de la régulation » pour le thème 5 : processus de suivi / contrôle de la mesure	38
Tableau 10 Données de la « BDD Pratiques de la régulation » pour le thème 6 : processus de validation / optimisation de la mesure.....	39
Tableau 11 : Nombre de parcs éoliens et d'éoliennes régulés, non régulés ou sans information dans la base de données « BDD Taux de régulation national »	40
Tableau 12 : Nombre de parcs éoliens régulés en faveur des chiroptères par région française et pourcentage associé.....	42
Tableau 13 : Nombre de projets éoliens par région déposés sur la plateforme projets-environnement.gouv.fr au 15 juillet 2021 pour lesquels une mesure de régulation était prévue ou non..	46
Tableau 14 : <i>Tableaux de synthèse des relevés des types d'argumentations présentés dans les rapports pour justifier de la reconduite, ou de l'évolution de la mesure de régulation</i>	114
Tableau 15 : Description des différentes modalités de régulation étudiées.....	119
Tableau 16 : Description des variables utilisées pour la modélisation de l'activité et de la mortalité.	122
Tableau 17 : Evaluation des différents modèles additifs généralisés à effets mixtes ajustés pour expliquer la mortalité sous les éoliennes non-régulées avec différentes variables d'activité mesurées en nacelle ou à la base de l'éolienne.	128
Tableau 18 : Evaluation des différents modèles additifs généralisés à effets mixtes réalisés pour expliquer la mortalité sous les éoliennes non-régulées avec différentes variables météorologiques, temporelles et de fonctionnement de l'éolienne.....	130
Tableau 19 : Evaluation des différents modèles additifs généralisés à effets mixtes réalisés pour expliquer la mortalité sous les éoliennes non-régulées avec différentes variables météorologiques et temporelles.	132
Tableau 20 : Résultats des différents modèles additifs généralisés à effets mixtes les plus parcimonieux réalisés pour expliquer l'activité à la base et au niveau de la nacelle avec différentes variables météorologiques et temporelles calculées à l'échelle de la nuit.	134
Tableau 21 Résultats des différents modèles additifs généralisés à effets mixtes les plus parcimonieux réalisés pour expliquer l'activité horaire à la base et au niveau de la nacelle avec différentes variables météorologique et temporelles.	138

FIGURES

Figure 1 : Variation de la température mondiale observée et réponses modélisées à des trajectoires stylisées des émissions et du forçage anthropique (source : GIEC 2019).....	9
Figure 2 : Exemple de graphique permettant de distinguer le référentiel d'activité et de le suivi de référence	21

Figure 3 : Carte par régions du nombre et pourcentage de documents informatifs récoltés dans le cadre de la base de données « BDD Taux de régulation national »	32
Figure 4 : Carte de répartition régionale du nombre de projets éoliens constituant la base de données « BDD Pratiques de la régulation / projets éoliens ».....	33
Figure 5 Répartition régionale de l'échantillon d'études utilisé pour qualifier les pratiques détaillées de la régulation en France (N=559).....	34
Figure 6 Répartition temporelle des études de suivis d'impacts analysées (N=549).....	35
Figure 7 Répartition régionale des auteurs des études analysées (N=559).....	35
Figure 8 : Proportions de parcs régulés, non régulés ou de statut inconnu en France (gauche) et proportions en excluant les parcs sans information (droite).....	41
Figure 9 : Proportions d'éoliennes régulées, non régulées ou de statut inconnu en France (gauche) et proportions en excluant les parcs sans information (à droite).....	41
Figure 10 : Nombre et pourcentage de parcs éoliens régulés en faveur des chiroptères, par région de France métropolitaine (uniquement sur le jeu de données des parcs éoliens avec information)	43
Figure 11 : Nombre et pourcentage d'éoliennes régulées en faveur des chiroptères, par région de France métropolitaine (uniquement sur le jeu de données des éoliennes avec information)	43
Figure 12 : Années de première mise en place d'une mesure de régulation sur les parcs éoliens de France métropolitaine.....	44
Figure 13 : Années de première mise en place d'une mesure de régulation sur les parcs éoliens de France métropolitaine, catégorisées en fonction de l'évolution de la réglementation relative aux parcs éoliens.	45
Figure 14 : Nombre de projets avec et sans régulation prévue, à l'échelle nationale et par découpage régional (pour les projets déposés sur la plateforme projets-environnement.gouv.fr au 15 juillet 2021) ..	46
Figure 15 : Evolution de la proportion des suivis bioacoustiques des chauves-souris en hauteur dans les études d'impacts de projets éoliens.....	49
Figure 16 : Proportion régionale des suivis en hauteur dans l'échantillon de rapports d'études d'impacts de projets éoliens.....	50
Figure 17 Histogramme des principales sources de données exploitées pour dimensionner la mesure (N=559).....	50
Figure 18 Histogramme de l'évolution temporelle des principales sources de données du processus de régulation.....	51
Figure 19 Disparités régionales des suivis de la mortalité (gauche) et des suivis de l'activité en hauteur (droite) au sein de l'échantillon d'études	52
Figure 20 Mode de régulation engagé selon le type de suivi acoustique utilisé dans le cadre des études d'impact d'un nouveau projet.....	54
Figure 21 Proportion des supports de suivis acoustiques exploités dans le cadre des études d'impacts pour des suivis réalisés en continu ou non	55
Figure 22 Evolution des supports de suivis acoustiques en hauteur utilisés dans le cadre des suivis d'impacts	56
Figure 23 Evolution des matériels de suivis acoustiques en hauteur utilisés dans le cadre des suivis d'impacts	57
Figure 24 Répartition régionale des matériels de suivis acoustiques en hauteur utilisés dans le cadre des suivis d'impacts.....	58
Figure 25 : Analyse comparative des capacités de détection des principaux enregistreurs à ultrasons, selon la distance, l'angle d'émission et les différentes plages de fréquences ultrasonores (source : Adams & al. 2012)	59
Figure 26 Mois de début (en bleu) et de fin (en orange) de suivi d'activité en hauteur dans l'échantillon de rapports de suivis d'impact	60
Figure 27 Histogramme de fréquence et diagramme en boîte de la durée des études acoustiques en hauteur dans l'échantillon de rapports de suivis d'impact	61
Figure 28 Graphiques des pratiques en termes de présentation de l'historique d'activité des chauves-souris en hauteur.....	63
Figure 29 Graphiques des pratiques pour le choix de la variable d'analyse de l'activité des chauves-souris en hauteur.....	65
Figure 30 Graphiques des pratiques en termes d'analyses comportementales dans la chronologie d'activité des chauves-souris en hauteur.....	65
Figure 31 Graphiques des pratiques en termes d'analyses de la phénologie des espèces dans la chronologie d'activité des chauves-souris.....	66
Figure 32 Graphiques des pratiques sur la prise en compte ou non d'un référentiel d'activité dans l'analyse de la chronologie d'activité des chauves-souris en hauteur	66
Figure 33 Graphiques des pratiques sur la prise en compte des conditions climatiques par espèces ou groupe d'espèces dans l'étude de l'activité des chauves-souris en hauteur.....	67
Figure 34 Graphiques des pratiques des paramètres climatiques pris en compte dans l'étude de l'activité des chauves-souris en hauteur.....	68

Figure 35 Histogramme de fréquence et diagramme en boîte de la durée des suivis de la mortalité dans l'échantillon de rapports de suivis d'impacts	70
Figure 36 Evolution comparative des diagrammes en boîte de la durée des suivis de la mortalité au fil du temps.....	71
Figure 37 Evolution comparative du nombre de passages de suivis de la mortalité dans le temps (nombres et pourcentage).....	72
Figure 38 Evolution comparative du nombre de passages moyens des suivis de la mortalité par régions	72
Figure 39 Répartition régionale des moyennes et écarts types de nombre de passages de suivis de la mortalité, toutes périodes confondues	73
Figure 40 Graphiques des pratiques en termes de nombre d'autotests réalisés (détection / prédation) dans le cadre des suivis de la mortalité.....	73
Figure 41 Graphiques des pratiques de prise en compte de la végétation dans le cadre des suivis de la mortalité	74
Figure 42 Graphiques des pratiques de prise en compte d'un intervalle de confiance dans l'estimation de la mortalité	74
Figure 43 Graphiques des pratiques pour la prise en compte des résultats de suivis de la mortalité d'autres parcs régionaux ou nationaux pour interpréter ceux du site d'étude.....	75
Figure 44 Evolution de la proportion de suivis croisés de l'activité en hauteur ET de la mortalité par régions.....	76
Figure 45 Evolution de la prise de décision d'engager une mesure de régulation dans les rapports d'études d'impacts de nouveaux projets	78
Figure 46 Evolution de la prise de décision d'engager une mesure de régulation dans les rapports de suivis d'impacts de parcs exploités.....	78
Figure 47 Proportion et évolution des modes de régulation retenus dans le cadre d'études d'impacts de nouveaux projets.....	79
Figure 48 Liens entre le mode de régulation retenu dans les études d'impacts et la pertinence du type de suivi acoustique engagé	80
Figure 49 Proportion et évolution des modes de régulation retenus dans le cadre de suivis d'impacts de parcs exploités.....	80
Figure 50 Modes de régulation retenus (nombre et proportion) dans les suivis d'impacts selon présence ou absence qu'une étude d'activité en hauteur et en continu.....	81
Figure 51 Mois de début (en bleu) et de fin (en orange) de période d'activité des patterns de régulation retenus par les études d'impacts de projets éoliens	83
Figure 52 Seuils de vitesse de vent (m/s) exploités dans les patterns de régulation retenus par les études d'impacts de projets éoliens.....	84
Figure 53 Seuils de température (°C) exploités dans les patterns de régulation retenus par les études d'impacts de projets éoliens.....	84
Figure 54 Typologie (proportion et évolution) des suivis d'impacts dans la chronologie de mise en œuvre et de validation / optimisation de la mesure de régulation	85
Figure 55 Proportion et nombre de patterns de régulation identiques ou différents entre deux campagnes de suivi interannuelles	86
Figure 56 Evolution de la proportion du nombre de paramètres présentés dans les patterns de régulation des rapports de suivis d'impacts analysés.....	86
Figure 57 Mois de début (en bleu) et de fin (en orange) de période d'activité des patterns de régulation retenus par les suivis d'impacts de parcs éoliens.....	87
Figure 58 Evolution dans le temps de la durée (mois) de la mesure de régulation retenue par les suivis d'impacts de parcs éoliens.....	87
Figure 59 Principale période d'activation de la mesure de régulation retenue dans les rapports de suivis d'activité	88
Figure 60 Proportion et nombre de patterns de régulation décomposés par sous-périodes (saisons) dans les rapports de suivis d'impacts	89
Figure 61 Répartition régionale des rapports de suivis d'impacts qui traitent d'un pattern de régulation décomposés par sous-périodes (saisons).....	89
Figure 62 Proportion et nombre de patterns de régulation avec détail de la plage horaire d'activation dans les rapports de suivis d'impacts.....	89
Figure 63 Proportion et nombre de patterns de régulation avec détail de la plage horaire d'activation dans les rapports de suivis d'impacts.....	90
Figure 64 Seuil de vitesse de vent le plus utilisé et évolution temporelle dans les rapports de suivis d'impacts	90
Figure 65 Décomposition par demi-mois des seuils de vitesse de vent retenus dans les patterns de régulation des rapports de suivis d'impacts.....	91
Figure 66 Proportion et nombre de patterns de régulation avec détail du seuil de température dans les rapports de suivis d'impacts	91
Figure 67 Décomposition par demi-mois des seuils de température retenus dans les patterns de régulation des rapports de suivis d'impacts.....	92

Figure 68 Proportion et nombre de patterns de régulation qui intègrent les précipitations comme paramètres dans les rapports de suivis d'impacts.....	92
Figure 69 Types de qualifications du paramètre de précipitation lorsqu'il est utilisé dans le pattern de régulation des rapports de suivis d'impacts.....	93
Figure 70 Tendances évolutives de l'utilisation des paramètres de patterns de régulation en fonction de l'évolution des prescriptions nationales.....	94
Figure 71 Proportion de rapports de suivis de parcs régulés qui présentent une analyse interannuelle des résultats.....	95
Figure 72 Corrélation entre résultats de la mortalité estimée et la mortalité brute pondérée.....	97
Figure 73 Proportion des critères les plus utilisés dans les conclusions d'analyses interannuelles de l'impact d'un parc éolien.....	97
Figure 74 Synthèse des perceptions de l'évolution interannuelle de l'activité des chauves-souris en hauteur dans les rapports de suivis d'impact.....	98
Figure 75 Taux de présence, dans les rapports de suivis de parcs régulés, d'une synthèse des périodes et résultats des suivis, et période de mise en place de la régulation.....	99
Figure 76 Proportion de rapports de suivis de parcs régulés qui vérifient la bonne mise en œuvre effective de la régulation sur la campagne testée.....	100
Figure 77 Importance de problèmes de mise en œuvre effective de la mesure dans les études qui ont traité cette question.....	100
Figure 78 Typologie des principales causes d'écart constatés entre le pattern et la mise en œuvre effective de la régulation.....	101
Figure 79 Evolution du taux de mortalité entre avant et après mesure de régulation en fonction du seuil moyen de vitesse de vent du pattern de régulation.....	104
Figure 80 Evolution de la mortalité brute pondérée entre avant et après mesure de régulation en fonction du seuil moyen de vitesse de vent du pattern de régulation.....	104
Figure 81 Evolution de l'impact par mortalité mesuré en moyenne entre avant et après mesure de régulation selon le nombre d'années de tests.....	105
Figure 82 Evolution 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.....	106
Figure 83 Appréciation de l'efficacité de la mesure de régulation en fonction de l'évolution du taux de mortalité dans les rapports de suivis d'impacts.....	109
Figure 84 Appréciation de l'efficacité de la mesure de régulation en fonction de l'évolution de la mortalité brute pondérée dans les rapports de suivis d'impacts.....	110
Figure 85 Appréciation de l'efficacité de la mesure de régulation en fonction de l'évolution du niveau d'impact résiduel (après mesure) dans les rapports de suivis d'impacts.....	111
Figure 86 Typologie des principales argumentations utilisées pour conclure sur l'efficacité ou l'absence d'efficacité de la mesure de régulation dans les rapports de suivis d'impacts.....	112
Figure 87 Localisation du parc d'Arques et des onze éoliennes étudiées.....	116
Figure 88 Chronologie d'activité acoustique des chauves-souris comparée aux relevées de mortalités sur le.....	118
Figure 89 Configuration du parc d'Arques retenu comme site pilote pour les tests de régulation.....	118
Figure 90 Répartition des données de mortalité suivant les modalités de régulation, les gradients de conditions météorologiques, d'activité en altitude et de phénologie observée pendant les suivis menés en 2019 et 2020.....	125
Figure 91. 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).....	126
Figure 92. Effets de l'activité chiroptérologique sur le nombre de cadavres et la probabilité de découvrir au moins une mortalité.....	129
Figure 93. Effets de la température et de la vitesse du rotor sur la probabilité d'observer au moins une mortalité.....	131
Figure 94. Effets des variables climatiques et de la date sur l'activité chiroptérologique à la base des éoliennes et en altitude.....	134
Figure 95. Effets des variables climatiques et de la date sur l'activité chiroptérologique mesurée à la base des éoliennes et en nacelle (résolution « heure »). Résultat des modèle GAMM.....	137
Figure 96. Pourcentage de réduction de mortalité observée suivant différents seuils de régulation.....	140
Figure 97 Mode de fonctionnement de ProBat. Illustration : Ulrike Eberius.....	154
Figure 98 Répartition de l'activité des chauves-souris dans la zone du rotor d'une éolienne (ProBat). Illustration : Ulrike Eberius.....	154
Figure 99 Répartition de l'activité mesurée via OPRECh par rapport à la vitesse de vent au niveau de l'éolienne 9 en 2019.....	155
Figure 100 Répartition mensuelle de l'activité mesurée via OPRECh au niveau de l'éolienne 9 en 2020.....	155
Figure 101 Répartition au cours de la nuit de l'activité mesurée via OPRECh au niveau de l'éolienne 9 en 2020.....	156
Figure 102 Vitesses de démarrage optimisées calculées par ProBat pour le parc éolien.....	157

Figure 103 : Nombre de mortalités brutes retrouvées pour des simulations de 3 pressions de suivi différentes sur le jeu de données du suivi mortalité d'Arques 1 & 2 en 2019 (100 répliques pour chaque pression de suivi simulée)	166
Figure 104 : Nombre de mortalités brutes retrouvées pour des simulations de 3 pressions de suivi différentes sur le jeu de données du suivi mortalité d'Arques 2bis & 3 en 2019 (100 répliques pour chaque pression de suivi simulée)	166
Figure 105 : Taux de mortalité par éolienne et par an simulé pour 100 répliques de différentes pressions de suivi sur Arques 1 & 2, par rapport au taux de mortalité réel calculé en 2019.....	168
Figure 106 : 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.	169
Figure 107 : Exemple de présentation d'une synthèse chronologique des résultats du suivi d'activité acoustique des chauves-souris depuis une nacelle d'éolienne.....	178
Figure 108 : Exemple de présentation de corrélation inverse entre la vitesse du vent et l'activité cumulée des chauves-souris en hauteur.....	178
Figure 109 : Exemples de présentations de décompositions horaires de l'activité cumulée des chauves-souris en hauteur.....	178
Figure 110 : Exemple de présentation de l'analyse comparative des résultats de mortalité avec ceux des parcs éoliens environnants dans une démarche d'analyse des effets cumulatifs (Ouest'Am).....	180
Figure 111 : Exemple de présentation de l'analyse comparative des résultats de mortalité des parcs éoliens situés dans les 30 km du site suivi (Exen).....	180
Figure 112 : Exemple de présentation de l'analyse de la mortalité croisée avec les phases de régulation implémentées.....	180
Figure 113 : Exemples de présentation de graphique de synthèse chronologique de l'activité et de la mortalité et des plages suivis et de mise en œuvre de la mesure de régulation (Exen).....	181
Figure 114 : Proposition d'aide au mode d'évaluation de l'efficacité ou de l'échec de la mesure pour différentes situations.....	184
Figure 115 : Exemple de tableau présentant les niveaux d'activité comparés entre la situation initiale sans régulation et l'activité résiduelle à risque après mesure.....	188
Figure 116 : Exemple de présentation d'une simulation de l'effet d'une mesure de régulation sur l'activité de référence.....	189
Figure 117 : Exemple de simulations de courbes de réduction de l'activité résiduelle à risque selon l'évolution du pattern de régulation	189

SIGLES ET ACRONYMES

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
OPRECh	Optimisation des Processus de Régulation des Eoliennes en faveur des Chiroptères

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

Programme OPRECh

Programme de recherche appliquée ciblé sur la mesure de régulation des éoliennes pour réduire les mortalités des chauves-souris.

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. Mais l'activité des chiroptères reste globalement difficile à modéliser précisément, même à l'échelle d'un site.

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.

