

Janvier 2024

Analyse des effets des éoliennes sur les chauves-souris

VEILLE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE - CHIROPTERES

PROGRAMME DE RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT N°2E

Rédacteurs

Marie LABOURÉ, chiroptérologue
Responsable d'études et de développement

Coordinateur

Nicolas LAGARDE, ornithologue
Responsable d'études

Supervision/approbation :

Pierre PAPON, Docteur en Géographie
Directeur du pôle écologie

Michaël LEROY, chiroptérologue
Responsable d'études et de développement

Sylvain LE ROUX
Géographe, Docteur en Géographie

Sommaire

1	INTRODUCTION.....	5
2	CONTEXTE DES INVENTAIRES ET MESURES DANS LE CADRE DE L'IMPLANTATION DE PARCS EOLIENS.....	8
2.1	Protocoles d'inventaire des chiroptères.....	9
2.2	Mesures ERC en phase construction.....	9
2.1	Mesures ERC en phase exploitation.....	9
2.1.1	Adaptation de l'éclairage des parcs éoliens.....	9
2.1.2	Aménagements évitant l'installation des chiroptères dans et à proximité des éoliennes.....	10
2.1.3	Programmation préventive des éoliennes.....	10
2.1.4	Systèmes de détection-réaction.....	10
2.1.5	Systèmes de dissuasions.....	11
2.1.6	Prise en compte des effets cumulés dans les mesures.....	11
2.2	Mesures de suivi.....	12
2.2.1	Estimation de la mortalité.....	12
2.2.2	Suivi comportemental.....	12
3	CATALOGUE DES DIFFERENTS SYSTEMES.....	13
3.1	Dispositifs d'inventaire des chiroptères lors de l'étude d'impact.....	14
3.1.1	Dispositifs d'écoutes actives.....	14
3.1.2	Dispositifs d'écoutes passives.....	18
3.2	Programmation préventive des éoliennes.....	20
3.3	Systèmes de détection-réaction.....	21
3.4	Systèmes de dissuasion.....	24
3.1	Systèmes de suivis.....	26
3.1.1	Estimation de la mortalité.....	26
3.1.1	Suivi comportemental.....	32
4	CONCLUSION ET DISCUSSION.....	38

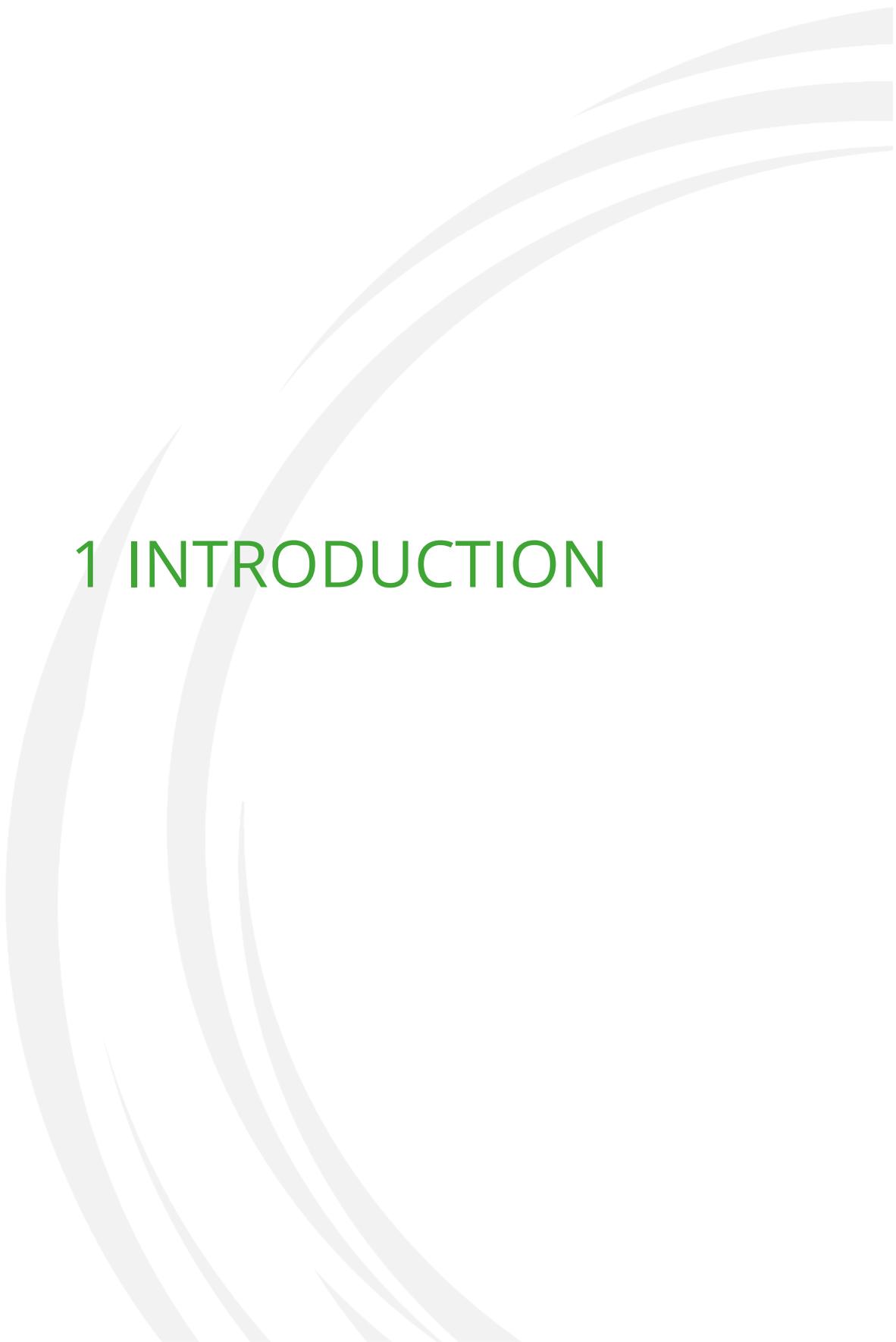
RÉSUMÉ

Dans le cadre de l'implantation de parcs éoliens en France des études réglementaires de suivi pré-implantation et post-implantation sont mises en place. Dans le cadre de ces études plusieurs mesures d'évitement, de réduction, de suivi, de compensation ou encore correctrices sont mises en place. Les évolutions scientifiques et techniques de ces dernières années ont permis de développer différents dispositifs visant à protéger au mieux les chiroptères lors de l'implantation de parcs éoliens. Dans l'optique de mieux connaître et comprendre les différents dispositifs existants, cette étude regroupe et analyse les points positifs et négatifs de chacun d'entre eux ainsi que les références bibliographiques associées.

MOTS CLÉS : chiroptères, éolien, mesure, dispositif, technologie, bibliographie, science.



1 INTRODUCTION



En France, l'implantation de parc éolien fait l'objet de plusieurs suivis réglementaires. Parmi ceux-ci, l'étude d'impact environnementale en amont de la mise en place des parcs éoliens et le suivi environnemental pour les projets éolien.

Les chiroptères sont des espèces dites longévives présentant une longévité élevée, une maturité sexuelle tardive et un taux de reproduction faible avec un petit par an expliquant un très faible taux d'accroissement des populations de chauves-souris (Culina *et al.* 2019, Kerbiriou *et al.* 2015b, Froidevaux *et al.* 2017). L'état des populations de chiroptères est encore mal connu mais le maintien de ces dernières repose sur la survie des adultes (Diffendorfer *et al.* 2015, Lentini *et al.* 2015, Culina *et al.* 2019). Bien que l'estimation des populations soit complexe à surveillée et que la taille des populations est encore loin d'être connue, les paramètres démographiques et, par conséquent, le potentiel impacts des décès sur la viabilité des populations de chauves-souris est un paramètre important à prendre en compte (Lenhert *et al.* 2014, Ellison LE 2013).

Des études récentes au niveau national présentent différents patterns avec des tendances à l'augmentation pour la Barbastelle d'Europe, le Grand Murin, le Grand Rhinolophe, le Murin à oreilles échancrées, le Petit Rhinolophe, la Pipistrelle de Kuhl et le Rhinolophe euryale et à l'inverse des tendances à la diminution pour le Minoptères de Schreibers, la Noctule commune, la Noctule de Leisler, le Petit Murin, la Pipistrelle commune et la Sérotine commune (Tapeiro *et al.* 2017, SFEPM 2016a, Bas *et al.* 2020). Globalement, la tendance de population au niveau national sur l'ensemble des espèces de chiroptères est en diminution entre 2006 et 2018 (Bas *et al.* 2020).

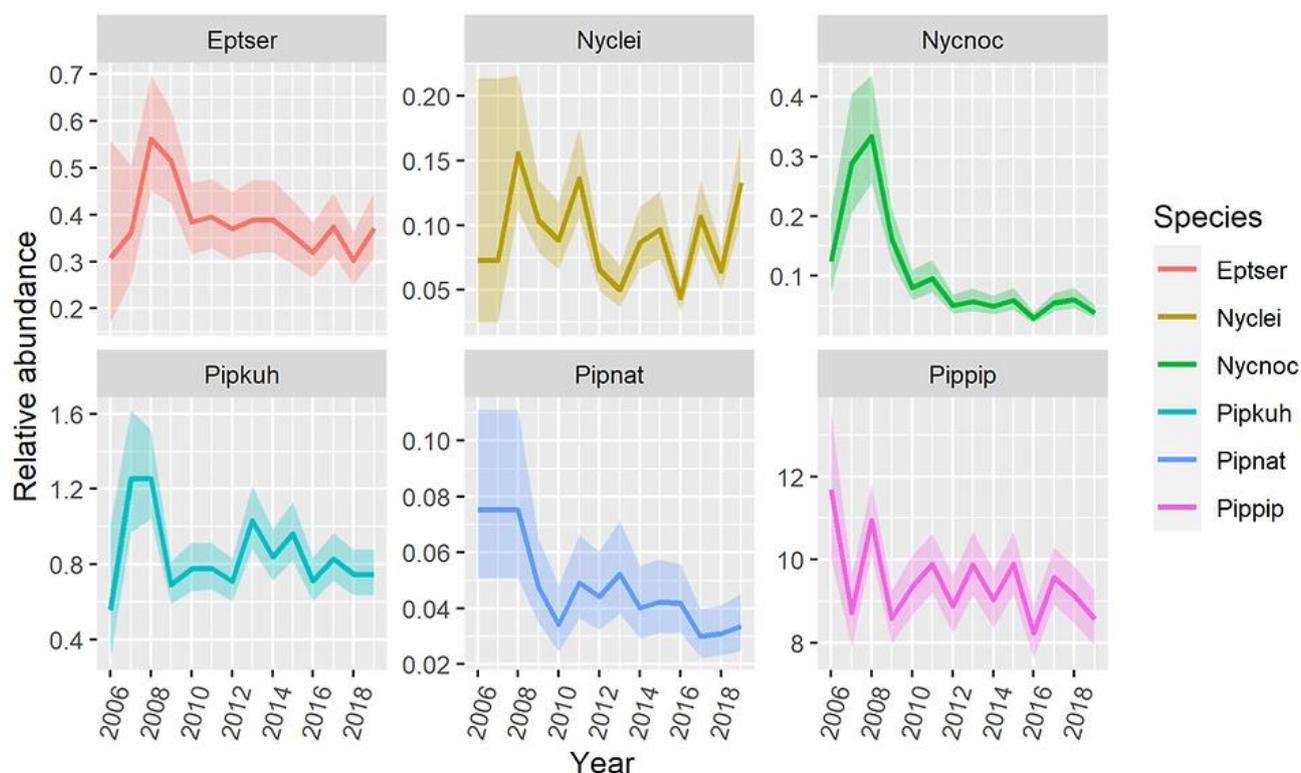


Figure 61 : Tendances des populations pour six espèces de chauves-souris en France entre 2006 et 2018 (Bas *et al.* 2020)

Face à ce constat de tendances de populations des chiroptères en diminution et plus particulièrement des espèces sensibles à l'éolien présentés ci-dessus, il apparaît crucial de protéger au mieux l'ensemble des espèces de chiroptères européennes. Parmi les solutions de protection des chiroptères la mise en place de mesures d'évitement, de réduction, de suivi ou encore de mesures correctrices apparaît primordiale dans

le cadre de l'implantation de parc éolien. Ainsi, plusieurs études ont testé l'efficacité de la mesure de réduction principale pour les chiroptères à savoir la mise en drapeau des éoliennes « cut-in-speed » selon des critères prédéfinis. Parmi ces études, Young et al en 2011 ont montrés une réduction de la mortalité de 72 % durant la première partie de la nuit et de 50 % durant la seconde partie de la nuit et Fowler Ridge a montré une diminution de la mortalité pouvant aller jusqu'à 73 % en fonction des critères de vitesse de vent prédéfinis.

Les innovations scientifiques et techniques dans ce domaine sont nombreuses et les dispositifs envisageables se multiplient notamment sur les systèmes prédictifs, de détection-réaction, de dissuasion ou encore de quantifiant de la mortalité.

Ainsi, la présente étude permet de réaliser un catalogue de différents systèmes existants présentant les points positifs et négatifs de ce derniers ainsi que leurs références associées.



2 CONTEXTE DES INVENTAIRES ET MESURES DANS LE CADRE DE L'IMPLANTATION DE PARCS EOLIENS

Lors la conception d'un parc éolien, des mesures visant dans un premier à éviter les impacts, puis à réduire ces derniers sont misent en place. Si des impacts résiduels (après mesures d'évitement et de réduction) significatifs subsistent, des mesures de compensation sont envisagées.

2.1 Protocoles d'inventaire des chiroptères

Dans le cadre de l'implantation de parc éolien, les inventaires sur les chiroptères consistent à des protocoles d'écoutes actives et/ou passive au sol comme en hauteur à l'aide de mât de mesure et à des prospections de gîtes arboricoles et bâti. Les protocoles menés sur les chiroptères sont en adéquations avec les guides de références sur les diagnostics des chiroptères dans le cadre de l'implantation de parcs éoliens (Eurobats 2014, SFPEM 2016).

2.2 Mesures ERC en phase construction

Durant les phases de chantier sur les parcs éoliens de multiples engins intervenants sur la construction utilisent des lumières blanches notamment. La lumière crée un phénomène d'attraction des chiroptères d'autant (Johnson *et al.* 2004, Horn *et al.* 2008, Beucher *et al.* 2013, Voigt *et al.* 2018), ce qui pourrait créer des perturbations pour les chiroptères de passage et les habituer à fréquenter le secteur à la recherche d'insectes. Ainsi, la mise en place des mesures d'évitement et de réduction suivantes sont préconisées :

- Cibler les périodes hivernales de novembre à février pour réaliser les travaux. La réalisation des travaux lors de cette période de léthargie des chiroptères permettra l'absence de dérangement des chiroptères. Si les travaux sont réalisés en dehors de cette période les deux mesures suivantes devront être appliquées.

- Lorsqu'un abattage d'arbre est nécessaire une procédure d'abattage non vulnérante est envisagée afin de protéger aux les potentielles espèces présentes malgré l'adaptation du calendrier d'intervention ;

- Dès lors que les travaux sont réalisés lors des phases actives du cycle biologique des chiroptères, il est préconisé de diminuer au maximum les phases de chantier lors des heures de nuit.

- Dès lors que les travaux sont réalisés lors des phases actives du cycle biologique des chiroptères, il est préconisé d'arrêter, le cas échéant de limiter au maximum l'éclairage sur les zones de travaux des parcs éolien sur les heures de nuit.

2.1 Mesures ERC en phase exploitation

La majorité des impacts sur les chiroptères ont lieu en phase exploitation avec un risque directe de mortalité des individus au niveau des éoliennes.

2.1.1 Adaptation de l'éclairage des parcs éoliens

Au même titre que durant la phase de construction, l'exploitation des éoliennes engendrera la mise en place de lumière au niveau des parcs éoliens. Ainsi, il est préconisé d'adapter l'éclairage des parcs éoliens pour limiter l'attraction des chiroptères et également des insectes pouvant provoquer une activité de chasse des chauves-souris au niveau de zone présentant de forts risques de mortalité (Beucher *et al.* 2013).

A noter que des études récentes ont évalués l'effet de la transition de l'éclairage conventionnel aux diodes électroluminescentes (LED) à économie d'énergie dans les parcs éoliens sur l'activité des chiroptères.

Des LED rouge ou blanche chaud entrecoupés de commandes sombres ont été testés. Ainsi, les LED rouges augmentent l'activité de vol des pipistrelles migratrices (Pipistrelle pygmée et Pipistrelle de Nathusius) alors que les LED blanches n'augmentent pas l'activité de vol mais l'activité de recherche de nourriture (Voigt *et al.* 2018).

2.1.2 Aménagements évitant l'installation des chiroptères dans et à proximité des éoliennes

Plusieurs publications relatent la présence de chiroptères sur des structures éoliennes. Ces phénomènes de gîtage ou de refuges notamment dans les nacelles d'éoliennes (Alhen *et al.* 2007 – 2009), dans les transformateurs de central (Lagerveld *et al.* 2016), à l'intérieur des fondations des turbines (Brabant *et al.* 2019) augmentent fortement les risques de collisions et de mortalité des chiroptères. Ainsi, il est préconisé de mettre en place des aménagements permettant d'éviter l'installation de chiroptères sur l'ensemble des structures des parcs éoliens. Les dispositifs envisagés devront permettre d'obstruer les gîtes potentiels sans être un danger pour les chiroptères s'approchant des structures.

2.1.3 Programmation préventive des éoliennes

Le principal risque de mortalité des chiroptères au niveau des parcs éoliens est la mortalité par collision avec les pales d'éoliennes. Cette mortalité est intrinsèquement liée à l'activité des chiroptères. Ainsi, les facteurs qui influencent l'activité des chiroptères sont multiples et sont également les facteurs de risque de mortalité pour les chiroptères. Ainsi, afin de réduire au mieux la mortalité des chiroptères, une mesure d'arrêt programmé des éoliennes en fonction de différents facteurs devra être appliquée sur une ou plusieurs (voire toutes) éoliennes des parcs éoliens. Plusieurs publications se sont intéressées aux « bridages » ou « cut-in-speed ». Il ressort de ces études une réduction du nombre de décès selon les facteurs utilisés pour mettre en place la programmation. Ainsi, il est estimé que le nombre total de décès de chiroptères est réduit de 33 % pour chaque augmentation d'1m/s dans le bridage pour des réductions totales de 33 à 79 % sur une année donnée pour un bridage à 5 m/s (Whitby *et al.* 2021). Ainsi, il apparaît important de baser la mesure d'arrêt programmé des éoliennes sur le plus de facteurs concomitants possibles, en prenant en compte la bibliographie sur le sujet et les résultats des études menés sur les zones d'implantations potentielles des parcs éoliens lors des inventaires pré-implantation (Behr *et al.* 2017, Marin *et al.* 2017). La perte économique pour l'éolien terrestre en Amérique du Nord suggère que ce type de réduction est susceptible d'entraîner une perte de 2 à 5 % de production de perte d'énergie (Baerwald *et al.* 2009, Arnett *et al.* 2011 - 2013, Martin *et al.* 2015, Dowling *et al.* 2018, Whitby *et al.* 2021).

2.1.4 Systèmes de détection-réaction

Parallèlement aux dispositifs de programmation préventive des éoliennes de dispositifs plus récents sont en cours de développement et de test sur l'éolien. Il s'agit des systèmes de détection-réaction "intelligent" qui désactivent la rotation des pales d'éoliennes uniquement lorsque les chiroptères sont détectés lors de situation à haut risque. Combinés à des modèles prédictifs de l'activité des chiroptères et en fonction des conditions météorologiques, ces systèmes pourraient permettre d'adapter l'arrêt des éoliennes à l'activité réelle et ainsi de réduire la perte de production et de revenus (Korner-Nievergelt *et al.* 2013, Smith & McWilliams 2016, Hayes *et al.* 2019). Ainsi, Normandeau Associates, Inc. développe la réduction intégrée de la mortalité par turbine (TIMRSM) depuis 2012. TIMRSM appartient à l'Electric Power

Research Institute et utilise des données acoustiques et de vitesse du vent en temps réel pour éclairer la réduction. Dans une étude de 2015 avec 10 turbines de contrôle et 10 turbines de traitement, des systèmes d'acquisition de données montés sur nacelle ont été installés pour collecter et analyser des données acoustiques tandis que des anémomètres de nacelle fournissaient des données sur la vitesse du vent. Si un appel de chauve-souris était détecté et que la vitesse du vent était inférieure à 8 m/s, une réduction était déclenchée. Les résultats ont montré des réductions significatives de la mortalité parmi les espèces (petite chauve-souris brune 91,4 %, chauve-souris argentée 90,9 % et chauve-souris cendrée 82,5 %) avec une perte de revenus estimée pouvant atteindre 3,2 % (Hayes *et al.* 2019). Parallèlement, les tests sur le système de surveillance acoustique et thermographique offshore (ATOM) ont noté qu'avec des moyens de transmission de données, une réduction intelligente en temps réel est possible (Willmott, Forcey et Hooton 2015). Bien que les développeurs de la technologie du système ATOM aient choisi de se concentrer sur les études avant et après la construction en tant qu'application principale (commercialisée pour l'offshore), d'autres ont continué à suivre cette approche (Hein & Straw 2021). Ainsi, Natural Power développe le système Bat Smart Curtailment, qui utilise un minimum de données acoustiques et de vitesse du vent pour éclairer les décisions de réduction en temps réel. Natural Power entreprend une étude pour assurer la conformité avec les protections des infrastructures critiques de la North American Electric Reliability Corporation, évaluer la compatibilité SCADA, évaluer la charge mécanique sur la turbine et valider l'efficacité.

2.1.5 Systèmes de dissuasions

Les dispositifs de dissuasion demandent à être testé et développé pour permettre d'obtenir des résultats positifs pour les chiroptères. Pour l'instant les systèmes de répulsifs/effarouchements acoustique ne semblent pas être une stratégie de minimisation actuellement viable sur les parcs éoliens (Hein & Straw 2021, Schirmacher *et al.* 2020, Waever *et al.* 2020, Romano *et al.* 2019). Le pourcentage de réduction des décès de chauves-souris par les systèmes de dissuasion continue d'être inférieur à celui obtenu par la plupart des stratégies de réduction testées. Les différences d'efficacité entre les espèces restent préoccupantes, en particulier pour les chauves-souris rouges de l'Est aux USA, où davantage de décès peuvent survenir lorsque les moyens de dissuasion sont opérationnels ne permettent pas de juger actuellement ces technologies comme fiables (Hein & Straw 2021).

Cependant, les moyens de dissuasion deviendront de plus en plus importants avec des turbines plus hautes avec des pales plus longues qui peuvent fonctionner à des vitesses de vent plus faibles et où l'impact sur la production des arrêts programmés des éoliennes sur ces vitesses de vent sélectionnées par les chiroptères deviendra de plus en plus important (Hein & Straw 2021).

2.1.6 Prise en compte des effets cumulés dans les mesures

Plusieurs auteurs relèvent la nécessité de programme de recherche sur les effets cumulatifs dans le cadre d'implantation de parcs éoliens (Platteeuw *et al.* 2017). Bien que les parcs soient à distances notables, ils pourraient impacter une seule et même population de chiroptères. En 2014, Lagerveld estime que dans le cas d'une mortalité de chauve-souris (Pipistrelle de Nathusius) par turbine et par an, cela induirait le décès de 8 000 individus en mer du Nord d'ici fin 2023 ce qui pourrait dépasser la population connue pour cette espèce.

Ainsi, il est possible de limiter les effets cumulés entre les parcs éoliens en veillant à la mise en place de mesure d'évitement et de réduction suffisantes à l'échelle de chaque parc éolien.

2.2 Mesures de suivi

2.2.1 Estimation de la mortalité

Dans le cadre de l'implantation des parcs éoliens, des mesures de suivis visant à estimer la mortalité et à vérifier l'efficacité des mesures doivent être mises en place. La principale méthode d'estimation de la mortalité sur les parcs éoliens terrestre est la recherche de carcasses au sol sous les turbines selon un protocole fixe (SFEPM 2016). Parallèlement, des technologies récentes, à l'instar de caméra (thermique, proche infrarouge), pourraient être témoins des collisions mais sont à des stades de développement très précoces et n'ont que récemment fait l'objet d'essais et de premiers retours d'expérience (Brown-Sarcino *et al.* 2018, Good&Shmitt *et al.* 2020, Matzner *et al.* 2020, Normandeau Associates 2021).

2.2.2 Suivi comportemental

En parallèle du suivi de la mortalité, des suivis comportementaux au sein des parcs éoliens doivent être mis en place afin de comprendre le comportement des chauves-souris dans ces structures mais également de pouvoir adapter et améliorer les mesures mises en place notamment la programmation préventive des éoliennes après la construction du parc éolien.

Il apparaît ainsi essentiel d'intégrer des suivis en hauteur des chiroptères dans le cadre de l'implantation de parcs éoliens (Hüppop *et al.* 2016). Pour ce faire les dispositifs mis en place sont généralement des suivis acoustiques à l'aide de détecteurs à ultrasons qui permettent de quantifier la fréquentation du site par les chiroptères et l'identification à l'espèce des individus présents. Ces dispositifs permettent également une corrélation avec les données météorologiques enregistrées par les éoliennes et doivent être réalisés *a minima* sur les périodes actives du cycle biologique des chiroptères (mars-novembre).

D'autres dispositifs de suivi comportementaux pourraient également être envisagés comme le système de surveillance acoustique et thermographique offshore (ATOM) qui se concentre sur les études avant et après la construction notamment au niveau des parcs éoliens ou d'autres dispositifs combinant l'acoustique aux systèmes de vision nocturne (thermique ou infrarouge).



3 CATALOGUE DES DIFFERENTS SYSTEMES

3.1 Dispositifs d'inventaire des chiroptères lors de l'étude d'impact

3.1.1 Dispositifs d'écoutes actives

Les dispositifs utilisés pour les écoutes actives sont détecteurs à ultrasons manuels permettant l'écoute en directe des chiroptères ainsi que l'enregistrements de séquences lors que cela est nécessaire. Plusieurs catégories existent dans ces dispositifs avec notamment l'hétérodyne, l'expansion de temps ou encore division de fréquence.

Type de dispositif	Référence du dispositif	Détails du dispositif	Points positifs	Points négatifs	Efficacité	Publication
Hétérodyne et/ou division de fréquence	Bat Box II De Stag Electronics	Détecteur physique uniquement en hétérodyne ou division de fréquence.		Ne permet l'identification de certaines espèces (murins, oreillards, etc.) en l'absence d'expansion de temps	Apprentissage ou animation mais complexe pour des études plus poussées	Barataud 2023
	Batbox IIID / Batbox Duet De Batbox Ltd				Barataud 2023	
	D200 / D230 De Pettersson Elektronik AB		Ergonomie et faible encombrement	Pas de mémoire tampon Pas d'enregistrement interne		Barataud 2023
	Anabat De Titley Electronic		Présence d'un affichage. Logiciel de tri automatique des signaux avec Analook Enregistrement interne GPS, thermomètre, hygromètre	Mauvaise qualité sonore en hétérodyne	Apprentissage ou animation mais complexe pour des études plus poussées. Logiciel associé intéressant.	Barataud 2023

Hétérodyne et expansion de temps	D240X De Pettersson Elektronik AB	Détecteur permettant d'écouter en hétérodyne et expansion de temps	Ergonomie et faible encombrement Rétroaction 1,7s Possibilité d'écoute en hétérodyne la séquence expansée Robuste et longue durée de vie	Pas d'enregistrement interne Mémoire tampon limitée	Application de la méthode d'inventaire de l'écologie acoustique. Matériel de référence afin de pouvoir quantifier l'activité. Pas utilisable en détecteur passif à cause de la durée d'enregistrement inenvisageable sur de la longue durée.	Barataud 2023
	D980 / D1000X De Pettersson Elektronik AB		Enregistreur interne Haute qualité de micro Nombreux paramètres Robuste et longue durée de vie Mise à jour logiciel	Cout élevé		Barataud 2023
	Active Recorder De Teensy Recorders		Enregistreur interne Rétro-action enregistrement à 8s Mise à jour logiciel Prix très accessible	Fabrication artisanale et réparation à faire soi même		Barataud 2023
	Bat Box Griffin De Batbox Ltd		Enregistreur interne Durée enregistrement non limité Thermomètre intégré	Peu ergonomique Pas de battement zéro lors de l'enregistrement Bruit de fond Limité dans les basses fréquences		Barataud 2023
	Echo Meter EM3 De Wildlife Acoustics		Enregistreur interne Présence d'un affichage. Scanner hétérodyne	Pas de retroaction Mauvaise sensibilité micro Pas de lecture en expansion de temps		Barataud 2023
	Echo Meter Touch		Multifonctions	Mauvaise qualité de micro et de détection		Barataud 2023

	De Wildlife Acoustics			amélioré dans les dernières versions	
	BatRecorder De Digital Biology	Dispositif d'écoute en hétérodyne et expansion de temps intégrant une application de visualisation des sonogrammes	Enregistrement en continu et sur demande. Visualisation des sonogrammes	Visualisation peut distraire et déranger l'identification acoustique	Barataud 2023
	SoundChaser De Acounect		Application complete	Fonctionne que sous windows Développement incertain	Barataud 2023
	BatSound Touch De Pettersson Elektronic AB			Microphone séparé du dispositif	Barataud 2023
	M500-384 De Pettersson Elektronic AB		Bon modèle de micro	Microphone séparé du dispositif Énergivore	Barataud 2023
	U384 De Pettersson Elektronic AB		Bon modèle de micro Bonne autonomie	Microphone séparé du dispositif Connectique parfois complexe et incompatible	Barataud 2023
	Ultramic 384K De Dodotronic			Microphone séparé du dispositif Encombrant	Barataud 2023

Tableau 1 : Synthèse bibliographique des dispositifs d'écoutes actives

Tableau comparatif de quelques détecteurs manuels :

	Pettersson D1000x	Active Recorder	Bat Recorder & micro 384	Batbox Griffin	Pettersson D240x	Anabat Walkabout
réglage hétérodyne	molette rotative	molette rotative	curseur vertical	bouton rotatif	molette rotative	molette rotative
écoute hétérodyne & division fréquence en simultané	oui	non	non	oui	non	non
écoute hétérodyne & expansion en simultané	oui	non	non	oui	oui	non
écoute hétérodyne durant l'enregistrement	oui	oui	oui	oui	oui	oui
écoute sur le terrain des séquences expansées	oui	oui	oui	oui	oui	oui
repassage en hétérodyne des séquences expansées	oui	oui	oui	non	oui	oui
confort d'écoute	excellent	correct	excellent	correct	correct	hét médiocre
Facteur d'expansion	2 ; 3 ; 5 ; 10 ; 20 ; 30	10	10 ; 20	10 ; 16	10	10
durée des enregistrements en expansion	non limitée	non limitée	non limitée	non limitée	1,7 ou 3,4 s	10 à 20 s
rétroaction de l'enregistrement (pre-trigger)	10 niveaux de 300 ms à 50 s	1 à 8 s	1 à 10 s	4 niveaux de 0,5 à 2 s	50 % durée	10 s
carte d'enregistrement interne	oui	oui	sur support	oui	non	oui
gamme fréquentielle microphone (kHz)	0 à 235	10 à 250	10 à 160	16 à 190	10 à 120	5 à 200
fréquence d'échantillonnage (kHz)	14 niveaux de 32 à 768	250 ou 384	384	705,6	307	500
résolution (bit)	16	12	16	16	8	16
qualité séquences	excellente	correcte	bonne	correcte	correcte	bonne
résistance aux chocs	bonne	bonne	moyenne	bonne	moyenne	bonne
résistance à l'humidité	bonne	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne	bonne
dragonne ou bandoulière	bandoulière (sur housse)	dragonne	aucune	aucune	dragonne	dragonne
ergonomie	bonne	correcte	passable	passable	excellente	bonne
autonomie avec accus rechargeables	6 h	50 h minimum	dépend type support	7 h	10 h	8 h
prix	4500 euros	120 euros	300 à 480 euros	1800 euros	1400 E + enregistreur	1700 euros
n. avantages forts	10	10	8	5	5	7
n. avantages modérés	8	5	4	7	4	4
n. inconvénients modérés	0	2	5	4	4	4
n. inconvénients forts	1	0	0	1	1	1

Légende couleurs :

avantage fort
avantage modéré
inconvénient modéré
inconvénient fort

Figure 1 : Comparatif des détecteurs manuels (Barataud 2023)

3.1.2 Dispositifs d'écoutes passives

Les dispositifs utilisés pour les écoutes passives sont détecteurs à ultrasons automatiques permettant l'enregistrement des séquences de chiroptères.

Type de dispositif	Référence du dispositif	Détails du dispositif	Points positifs	Points négatifs	Efficacité	Publication
Enregistreur automatiques	Batlogger De Elekon	Enregistreurs automatiques sans possibilité d'écoute en direct	Détecteurs / enregistreurs associés à un logiciel d'identification automatique Maniable avec un GPS intégré Bonne qualité sonore	Sortie audio en expansion de temps x10 Consommation électrique assez élevée	Enregistrements longue durée (plusieurs nuits sur des nuits complètes) Beaucoup de séquences nécessitant un traitement important	Barataud 2023 Julien 2011
	D500X De Pettersson Elektronic AB		Maniable Très bonne qualité sonore	Consommation électrique assez élevée		Julien 2011
	Passive Recorder De Teensy recorders		Open source / Mises à jour Qualité supérieure des signaux au spectrogramme Bonne fonctionnalité	Absence de rétroaction Parfois présence de fréquence parasites		Barataud 2023 Barataud 2021
	SM2 / SM3 / SM4 De Wildlife acoustics		Dérivé d'un enregistreur dédié aux sons audibles Enregistrements sur plusieurs canaux simultanés pour le SM2 et SM3 Possibilité de câbles de déport longue distance Bonne autonomie et grand stockage de sons Déclenchement automatique sophistiqué	Qualité sonore moyenne Consommation électrique assez élevée		Barataud 2023 Julien 2011

		<p>Programmation modulable avec les différents filtres</p> <p>Traitement possible des sons par des logiciels automatiques</p>		
	<p>Batcorder De EcoObs</p>	<p>Détecteurs / enregistreurs associés à un logiciel d'identification automatique</p> <p>Très bonne qualité sonore</p> <p>Faible consommation électrique</p>	<p>Limite de détection sur les basses fréquences pouvant filtrer des espèces</p>	<p>Barataud 2023 Julien 2011</p>
	<p>AR125 / AR180 De Binary Acoustic Technology</p>	<p>Acquisition directe par ordinateur accompagné par un petit boîtier avec faible consommation</p> <p>Maniable avec PC ultra portable</p> <p>Bonne qualité sonore</p>		<p>Julien 2011</p>
	<p>Tranquility Transect De Courtpan Design Ltd</p>	<p>Enregistrement continu au déclenchement</p>	<p>Nécessité de coupler avec un enregistreur</p>	<p>Barataud 2023</p>
	<p>Laar TR 30 De Laar Technology and Consulting</p>		<p>Sortie audio en expansion de temps x10</p>	<p>Barataud 2023</p>
	<p>AudioMoth De Openacousticdevices</p>	<p>Open source / Mises à jour</p> <p>Bonne fonctionnalité</p>	<p>Enregistre en continu sur une période défini</p> <p>Distorsion des sons au niveau des sonogrammes</p>	<p>Barataud 2021</p>

Tableau 2 : Synthèse bibliographique des dispositifs d'écoutes passives

3.2 Programmation préventive des éoliennes

Le système actuellement le plus utilisé est la programmation préventive des éoliennes sur la base de données enregistrées en amont, sur le site d'implantation des parcs éolien, ou sur la base de valeurs théorique. Le tableau suivant présente des dispositifs permettant de récolter les données nécessaires et d'appliquer les programmations préventives des éoliennes.

Type de dispositif	Référence du dispositif	Détails du dispositif	Points positifs	Points négatifs	Efficacité	Publication
Programmation préventive avec accompagnement logiciel	Fixed Environmental Stop Programm (FESP)	Arrêt programmé des éoliennes selon des paramètres météorologiques fixes. Objectif d'éviter 95 % des collisions			Dispositif qui apparait efficace mais très similaire a un arrêt programmé des éoliennes	Hanagasioglu <i>et al.</i> 2015 SWILD 2015
	Chirotech	Réguler les éoliennes sur la base de données chiroptérologique et météorologique des années précédentes Corriger la régulation par la prise de mesure en temps réel	Diminution de la mortalité de l'ordre de 57 à 74 % sur 5 des 8 éolienne équipée sur un parc éolien en Vendée		Système testé sur plusieurs sites pendant plusieurs années et a montré une diminution significative de la mortalité des chiroptères sous les éoliennes régulées.	Lagrange et al. 2013 Biotope 2009
	ID Stat	Comptabilisation des chocs sur les pales des éoliennes par l'identification des signaux vibroacoustiques provoqués par la collision des chiroptères. Définition des conditions favorables aux collisions par le système statistique pour mettre en place des mesures adaptées			Peu d'information, de retour et de publications sur l'efficacité de ce dispositif.	Delprat & Alcuri 2011 Eneria 2010

Tableau 3 : Synthèse bibliographique des dispositifs de programmation préventive sur des parcs éoliens.

3.3 Systèmes de détection-réaction

Parmi les systèmes les plus prometteurs et affichant de nombreux dispositifs à l'étude avec les innovations technologiques récentes, se trouvent les systèmes de détection-réaction. Le tableau suivant détaille les différents dispositifs ainsi que leur analyse bibliographique.

Type de dispositif	Référence du dispositif	Détails du dispositif	Points positifs	Points négatifs	Efficacité	Publication
Arrêt programmé par des mesures en direct	Remote Acoustic Monitoring System ReBAT 21 couple à TIMR	ReBAT : détecteur à ultrasons (AR125 de Binary Acoustic Technologies) et boîte de contrôle informatique qui stocke les sons, transmet les données et vérifie le bon fonctionnement. TIMR : relie des données météo à l'activité des chauves-souris de ReBAT en temps réel pour calculer un taux de mortalité relatif communiqué au SCADA qui bride l'éolienne en fonction	Réduction significative de la mortalité avec une diminution de la mortalité estimée entre 74 et 91 %/	Nécessité d'études complémentaires en Europe.	Système fonctionnel qui affiche des résultats intéressants aux USA mais nécessite une étude plus approfondie sur les espèces européennes.	Normandeau 2015 Hayes et al. 2019
	DTBat	Détection des chauves-souris en temps réel via plusieurs détecteurs (Anabat SD2) dans la zone de rotation des pales avec un logiciel d'arrêt des éoliennes	92,4% d'activité protégée avec l'éolienne arrêtée selon la meilleure combinaison de critères	Forte dépendance au temps d'arrêt machine Pas de prise en compte de la mortalité en temps réel Pas de résultats valables sur l'efficacité du dispositif	Réaction en temps réel. Bonne protection de l'activité des chiroptères lorsque les critères sont bien choisis. En attente de résultats valables sur l'efficacité du dispositif	Hanagasioglu et al. 2015 SWILD 2015 Loiret Nature environnement 2009 Eurobats 2019
	EPRI	Système d'arrêt des éoliennes en temps réel lors de la détection des chiroptères	Réduction de la mortalité de 83 % et de 90 % sur l'espèce américaine <i>Myotis lucifugus</i>	Pas encore de tests réalisés sur les espèces européennes	Efficacité sur les espèces américaines mais pas encore testé en Europe	EPRI 2017 Eurobats 2019

	ProBat - SensOfLife	Système de régulation sur la base d'une analyse prédictive associée à une détection en temps réel	Système simple et accessible à distances Permet de protéger 90 % de l'activité chiroptérologique en réduisant la perte de productible	Détection limitée du microphone. Résultats dépendant des espèces avec des problèmes de fonctionnement sur les sites avec des fortes activités de Pipistrelle de Nathusius	Peu de publication sur la fiabilité du système	ABIES 2010 Sens of Life Eurobats 2019 Behr <i>et al.</i> 2018 Voigt <i>et al.</i> 2018
	SafeWind	Détection automatisée en temps réel de la faune volante via des caméra pour détecter les intrusions dans les zones à risques et engage en fonction des actions d'effarouchement ou de régulation	Mesure unique pour chiroptères et avifaune Possibilité d'effarouchement et de régulation	Détection complexe sur les espèces de petite taille. Forte dépendance au temps d'arrêt machine Peu d'études en dehors du fournisseur pour démontrer l'efficacité.	Peu de publication sur la fiabilité du système	Biodiv-Wind - Roche <i>et al.</i> 2018
	EchoSense	Détection acoustiques des chiroptères, enregistrement des données météorologique et traitement des données en direct selon un ensemble de paramétrage permettant d'arrêter ou de redémarrer l'éolienne individuellement	Système testé et installé sur de nombreux parcs éolien américains et tests en cours en Angleterre Commande individuellement les éoliennes		Système aussi efficace que les bridages classiques préventifs pour réduire la mortalité des chauves-souris et optimiser les bénéfices économiques du parc éolien	Rodriguer <i>et al.</i> 2022 Natural Power
	RENEBAT	Modèle prédictif de l'activité des chiroptères en fonction de différentes variables et du niveau d'activité spécifique de l'éolienne	Résultats solides sur les relations entre l'activité des chiroptères et la mortalité. Bridage optimisée bénéfique aux chiroptères et aux exploitants.	Protocoles lourds et rigoureux	Dispositif efficace mais nécessitant une application similaire à celle des tests réalisés lors de l'étude initiale du laboratoire de recherche	Behr <i>et al.</i> 2015 Korner-Nievergelt <i>et al.</i> 2013 Behr <i>et al.</i> 2011 Lindermann <i>et al.</i> 2018

			Plusieurs tests et publications sur le sujet			
	ProBat - WindBat	Logiciel visant à faciliter l'utilisation de l'algorithme développé par RENEBAT	Similaire à RENEBAT	Similaire à RENEBAT	Similaire à RENEBAT	WindBat
	Fleximaus	Outil développée pour contrôler le fonctionnement des éoliennes à partir de l'algorithme proposer par Probat. Interface entre Probat et le logiciel qui fait fonctionner le SCADA	Testé sur plusieurs parcs Optimise les données de Probat en tenant compte des données météorologiques en temps réel Approche à l'échelle du parc éolien	Similaire à RENEBAT	Similaire à RENEBAT	Felt <i>et al.</i> 2016
Radar	MERLIN DeTect	Système de radar doppler surveillant les oiseaux et les chiroptères avec évaluation des risques, surveillance et arrêt des éoliennes en temps réel (MERLIN SCADA)	Plus de 40 systèmes fonctionnant sur des parcs éoliens (USA, Royaume-Uni, Canada, Europe, Afrique, Nouvelle-Zélande)	Peu d'études en dehors du fournisseur pour démontrer l'efficacité.	Dispositif qui paraît efficace mais manque de validation par des publications scientifiques	Merlin DeTect 2021
	Radar - Sens Of Life	Système de radar permettant de suivre les trajectoires (oiseaux, chiroptères, papillons...) et d'émettre des alertes sonores ou d'arrêter les éoliennes en cas de trajectoires à risque	Peu de détails sur les résultats de ce dispositif	Peu d'études en dehors du fournisseur pour démontrer l'efficacité.	Peu de publication sur la fiabilité du système	Sens Of Life

Tableau 4 : Synthèse bibliographique des dispositifs de détection-réaction envisageables sur des parcs éoliens.

3.4 Systèmes de dissuasion

Le tableau suivant détaille les différents dispositifs ainsi que leur analyse bibliographique.

Type de dispositif	Référence du dispositif	Détails du dispositif	Points positifs	Points négatifs	Efficacité	Publication
Système acoustique monté sur nacelle	/	Répulsif à ultrasons de 20 à 50 khz	Diminution de la mortalité de 20 à 53 % la première année puis de 18 à 62 % la deuxième année	Dérangements potentiels sur les insectes. Efficacité variable en fonction des espèces Efficacité variable en fonction de la distance et des conditions météorologiques	Efficacité au sol mais variable sur les éoliennes en fonctionnement et selon les espèces	Arnett <i>et al.</i> 2013a Szewczak et Arnett 20-6 - 2007 Spanjer et al. 2006
	General Electric	Avertisseur pneumatique ou buse sur une plage de fréquence de 30 à 100 khz à l'aide d'air comprimé	Réduction de 30 % de la présence de certaines espèces Réduction significative pour deux espèces au Brésil	Entre 35 % et 56 % de la zone balayée par le rotor ne sont pas couverts par les sons émis. Réduction non significative des décès pour la majorité des espèces étudiées et une augmentation significative des décès pour une autre espèce.	Système efficace jusqu'à 30 m. Résultats très variables en fonction des espèces avec parfois un effet inverse sur la mortalité	Romano <i>et al.</i> 2019 Kinzie <i>et al.</i> 2018
	NRG Systems	Système de transducteurs piézoélectriques organisés par fréquences en 6 sous-réseaux (20, 26, 32, 38, 44, 50 khz)	Dans la majorité des cas la mortalité a été réduite	Augmentation de la mortalité pour certaines espèces américaine (<i>Lasiurus borealis</i> , <i>Eptesicus fuscus</i>)	L'efficacité reste à prouver et aucun test n'a encore été réalisé en Europe	Schimacher et al. 2020 Weaver et al. 2020 Eurobats 2019 Velasquez & Morton 2018

<p>Système acoustique monté sur pales</p>	<p>Université du Massachusetts</p>	<p>Système de dissuasion passif avec des sifflets sur les plages de fréquences de 25-35 khz, 35-45 khz et 45-55 khz.</p>			<p>Résultats non significatifs en Laboratoire mais les chiroptères semblent préférer les perchoirs silencieux à ceux équipés du dispositif.</p> <p>Essais au sol en milieu naturel en cours</p>	<p>Hein & Straw 2021</p>
	<p>Université de l'état d'Iowa</p>	<p>Système de dissuasion passif avec des résonateurs couvrant les fréquences de 20 à 50 khz</p>			<p>Projet aux premiers stades de développement</p>	<p>Hein & Straw 2021</p>
	<p>Frontier Wind</p>	<p>Système de dissuasion piézoélectrique alimenté par l'éolienne couvrant quatre sous-réseaux (25, 35, 45 et 55 khz)</p>			<p>Complications liées à l'alimentation électrique ont été résolus mais les nombreux retards ont entraîné l'annulation du projet</p>	<p>Cooper <i>et al.</i> 2020</p>
	<p>Midé Technology</p>	<p>Système de dissuasion piézoélectrique auto-alimenté couvrant les fréquences de 20 à 50 khz</p>			<p>Premiers essais de la technologie prévus en 2021</p>	<p>Hein & Straw 2021</p>
<p>Champ électromagnétique</p>	<p>/</p>	<p>Diffusion de rayonnement électromagnétique dégagé par des installations radar</p>	<p>Chiroptères plus actifs en dehors des champs électromagnétiques élevés</p>	<p>Pas testé sur des parcs éoliens.</p> <p>Répulsion associée à une combinaison spécifique de longueur d'onde, de répétition de signaux, de puissance et d'orientation qui reste à affiner</p> <p>Risque sur la santé des chiroptères, de la biodiversité et humaine</p>	<p>Efficacité potentielle mais nécessitant des paramètres très précis et montrant de potentiels risques pour la santé</p>	<p>Nicholls <i>et al.</i> 2009 Nicholls <i>et al.</i> 2007</p>

Lumière Ultraviolet	US Geological Survey	Système de lumière UV scintillante pour l'éclairage des éoliennes	La faible lumière UV réduit l'activité des chiroptères malgré une augmentation de l'abondance d'insectes. Ciblé sur les chiroptères en évitant l'influence sur l'avifaune		Efficace sur de plus grande distance par rapport aux ultrasons Nécessité d'essais supplémentaires sur des éoliennes opérationnelles.	Gorrensens <i>et al.</i> 2015a – 2015b
Texture des mâts d'éoliennes	Université chrétienne du Texas	Application d'un revêtement texturé sur les mâts d'éolienne (surface lisse des éoliennes peuvent être interprété à tort comme une ressource potable par écholocation)	Expériences en laboratoire potentiellement efficace	Premiers tests réalisés sur des éoliennes pas concluant	Les expériences en laboratoire ont indiqué une efficacité potentielle mais les premiers essais sur les éoliennes n'ont pas été concluant	Bennet et Hale 2018

Tableau Erreur ! Signet non défini. : Synthèse bibliographique des dispositifs de dissuasions envisageables sur des parcs éoliens.

3.5 Systèmes de suivis

3.5.1 Estimation de la mortalité

L'un des éléments cruciaux dans l'implantation des parcs éolien est l'estimation de la mortalité post-implantation. Pour réaliser ces suivis de mortalité la méthode la plus utilisé est la recherche de cadavre au sol lorsque cela est possible (quid des parcs éoliens offshore). Cependant, cette méthode présente plusieurs biais (zone prospectable, chercheur, prédation, etc.) qui, bien que corrigée par des estimateurs dans les calculs de mortalité, affichent des variabilités importantes sur le nombre de cadavres générés par les parcs éoliens. Les avancées technologiques ont permis de développer des dispositifs pour essayer d'estimer la mortalité. Les différents dispositifs ainsi que leur analyse bibliographique sont présentés dans le tableau suivant.

Type de dispositif	Référence du dispositif	Détails du dispositif	Points positifs	Points négatifs	Efficacité	Publication
Radar	/	Radar disposé sur des éoliennes en mer baltique	Capable de détecter les grandes espèces chauves-souris	Impossible de détecter les petites espèces de chauves-souris	Suivi possible uniquement sur les grandes chauves-souris de type Noctules mais pas sur les gabarits inférieurs.	Alhen <i>et al.</i> 2007

	Robin Radar	Système radar (Max Avian Radar) capable de détecter les oiseaux et les chauves-souris.	Capable de détecter des chauves-souris et des oiseaux. Capable de détecter des petits avions à 15 km, des petits canards à 10 km et des passereaux à 6 km	Impossible d'identifier une espèce chauve-souris	Système efficace pour détecter les chauves-souris mais de définir l'espèce.	Lagerveld <i>et al.</i> 2020
	DeTect Merlin Avian Radar System	Système de radar automatique horizontal pour détecter les passages d'oiseaux et de chauves-souris	Passereaux détectables de 135 m à 2866 m.	Résultat inconnu sur les chiroptères	Des tests complémentaires sont nécessaires pour juger de l'efficacité du dispositif	Lagerveld <i>et al.</i> 2020, May <i>et al.</i> 2017
	BirdScan MR1	Système de radar pour un suivi quantitatif sur le long terme des oiseaux et chauves-souris. Radar verticale avec direction conique. Système placé à maximum 150 m de l'éolienne.	Capable de détecter des petits passereaux et des chiroptères au-delà d'une altitude de 1000m. Utilisation d'un logiciel qui est capable de détecter et d'exclure ce qui n'est ni un oiseau, ni une chauve-souris.	Impossible d'identifier une espèce chauve-souris	Système efficace pour détecter les chauves-souris mais de définir l'espèce.	Lagerveld <i>et al.</i> 2020
	LIDAR	Système de détection sur le même principe que le radar mais en se basant sur la lumière laser plutôt que les ondes radios.	Distinction entre une chauve-souris et un oiseau possible. Détection d'objet beaucoup plus petit qu'avec le radar.	Sensible au brouillard, à la pluie et à la neige LIDAR affecté par la réflexion des pales limite la détection d'impacts.	Aucun produit prêt à l'emploi dans le domaine de la détection des chiroptères ou des oiseaux n'est encore disponible	Lagerveld <i>et al.</i> 2020, Hadj-Bachir & De Souza 2019, Malmqvist <i>et al.</i> 2018, Prost <i>et al.</i> 2013
Détecteur d'impacts	/	Détecteur d'impacts dans les pales du rotor	Détecte de manière fiable les collisions d'au moins 57g (balle de tennis tirées avec des canons à air)	Les capteurs ne peuvent pas détecter les collisions de chiroptères migratrices pesant entre 8 et 40g.	Une amélioration du dispositif sur des poids plus léger est nécessaire pour juger de son efficacité sur les chiroptères	Hu <i>et al.</i> 2018
	WT-Bird	Détecteur acoustique d'impacts sur les pales déclenchant une	Le dispositif est en test sur le parc éolien offshore	Les collisions avec les passereaux et les	Projet temporairement à l'arrêt après un manque de fiabilité	Lagerveld <i>et al.</i> 2020,

	ECN	caméra infrarouge en cas de collision	d'OWEZ. Système en cours d'amélioration	chauves-souris ne sont pas détectées. Manque de fiabilité après lors des trois années premières années de tests	lors des tests. Une amélioration du système de détection est prévue en 2020.	Wiggelinkhuizen <i>et al.</i> 2006, Wiggelinkhuizen <i>et al.</i> 2010, Dirksen 2017 Fairley 2007
	ID-Stat	Système de microphone à la base de chaque pale pour détecter le son d'un impact.		Testé sur une situation terrestre et permet de détecter des objets de 2,5 g.	Des tests complémentaires sont nécessaires pour juger de l'efficacité du dispositif	Lagerveld <i>et al.</i> 2020, Delprat & Alcuri 2011
Détecteur acoustique	/	Détection acoustique des chiroptères en nacelle d'éolienne			Information sur la composition des espèces, la temporalité, le taux d'activité mais ne permet pas de connaître la mortalité en dehors d'estimation sur la base de l'activité qui reste discutable	Solick <i>et al.</i> 2021
	DT-Bat	Système qui arrête les turbines en fonction d'un seuil prédéfini lorsque la détection acoustique atteint le seuil. Le système peut être associé à des caméras thermiques	La caméra thermique détecte les oiseaux et les chauves-souris en vol et collision	Les détecteurs acoustiques sur mat ou en nacelle ne couvre pas tout le rotor pour toutes les espèces.	La détection apparaît plutôt efficace avec les détections acoustiques et thermiques la couverture du rotor apparaît limitée. Des études complémentaires sont nécessaires pour juger de l'efficacité	Lagerveld <i>et al.</i> 2020, Dplazes <i>et al.</i> 2015
Caméra infrarouge	Visual Automatic Recording System (VARS) IfAOe	Système de caméra pour enregistrement automatique d'oiseaux et de chauves-souris en vol	Sous bonne condition, la détection des petits oiseaux est de 100 %. La détection est possible au-delà de 80 m.	Ne couvre pas tout le rotor (limité à 22°). Aucune détection de chiroptères n'est publiée	Les premiers résultats montrent des difficultés de détection sur les chiroptères	Lagerveld <i>et al.</i> 2020, Collier <i>et al.</i> 2012, Dirksen 2017, Mollis <i>et al.</i> 2019
	Aerofauna Collision Avoidance	Deux systèmes de caméras haute définition (de jour) associés à un des caméras	Possibilité de détecter les chiroptères	Possibilité de détecter les chiroptères mais pas au-	Les premiers résultats montrent des difficultés de détection sur les chiroptères	Lagerveld <i>et al.</i> 2020, Adams <i>et al.</i> 2017

	Monitoring Système (ACAMS)	infrarouges et des spots infrarouge. Algorithme 3-D développé pour isoler et suivre l'objet		delà d'une distance de 60 mètres. Les premiers résultats montrent une détection des aigles à plus de 500 m mais des chiroptères indétectables.		
	TrackBat - BatCam	Détecteur de la chaleur émise par les chiroptères à l'aide de caméra infrarouges pour étudier le comportement et automatiser le suivi de la mortalité à proximité des éoliennes				Sens Of Life
Caméra thermique	DT-Bat / DT-Brid	Système de caméras thermique qui arrête les turbines en fonction d'un seuil prédéfini lorsque la détection atteint le seuil.			La caméra thermique détecte les oiseaux et les chauves-souris en vol et collision mais ne couvre pas tout le rotor.	Lagerveld <i>et al.</i> 2020, Dplazes <i>et al.</i> 2015
	B-FINDER « Automatic bats & birds mortality monitoring for wind power»	Système basé sur trois anneaux de caméras thermiques montés sur le mât pour détecter un objet tombant.	Détection de toutes les espèces de chauves-souris au-delà de 50 m des éoliennes (minimum 95 %)		Système développé pour les parcs terrestre et offshore. Bonne détection des espèces de chiroptères	Lagerveld <i>et al.</i> 2020, Przybycin <i>et al.</i> 2019
	Thermal Tracker 3D	Système basé sur des caméras thermique pour extraire les trajectoires tridimensionnelles des mouvements des animaux	Quantifie l'activité de vol d'oiseaux et chauves-souris en termes de taux de passage, de hauteur de vol, de vitesse de vol et de schémas d'occurrence à endroits éloignés. Données qui permettent la mise en		Quantifie le comportement d'évitement et détecter les collisions sur les sites éoliens en exploitation. Nécessité d'améliorer et de valider les modèles actuels de risque de collision.	Matzner <i>et al.</i> 2020

			place de modèle de risque de collision.			
Dispositifs combinés	Acoustic and Thermographic Offshore Monitoring (ATOM)	<p>Système pour détecter des objets avec une combinaison de caméras thermiques, de caméras visuelles et des enregistreurs acoustiques</p> <p>Le système de caméra thermique calcule, enregistre et stock les données d'attitude de vol des objets volants mais n'enregistre pas les collisions.</p>	<p>Système utilisable pour les oiseaux et les chiroptères.</p> <p>Capacité de détection de l'abondance, de la hauteur de vol, de la direction de la vitesse. Couvre l'ensemble du rotor lors des bonnes conditions de vent.</p>	<p>Détection thermique des chiroptères pas concluante durant les tests.</p> <p>Détection acoustique des chauves-souris de moins de 20 m.</p>	<p>Détecte les oiseaux et les chauves-souris.</p> <p>Système prometteur adapté à l'éolien notamment offshore.</p> <p>Nécessité d'améliorer la détection des chiroptères.</p>	<p>Normandeau Associates 2021</p> <p>Lagerveld <i>et al.</i> 2020,</p> <p>Mollis <i>et al.</i> 2019,</p> <p>Wilmott <i>et al.</i> 2015</p>
	/	<p>Radar de pointage vertical couplé à une imagerie de caméra thermique</p>		<p>Seulement 45 chiroptères de détectés en 520h à cause d'une vision limitée et de l'incapacité à distinguer les chauves-souris des oiseaux</p>	<p>L'efficacité du dispositif n'apparaît pas concluant sur les chiroptères</p>	<p>Geo-Marine 2010</p>
	Wind Turbine, Sensor Unit for Monitoring of Avian & Bat Collisions	<p>Système contenant des détecteurs d'impacts et des accéléromètres sur chaque pale avec des caméras visuels et infrarouges et des microphones acoustiques</p>	<p>Enregistre les collisions des animaux avec les pales.</p>	<p>Testé sur des balles de tennis de 57 g mais pas sur plus petit comme les chauves-souris.</p> <p>Ne détecte pas les barotraumatismes</p>	<p>Enregistre les collisions des animaux avec les pales mais ne détecte pas forcément les chiroptères. Des tests d'efficacité sont encore attendus</p>	<p>Hu <i>et al.</i> 2018</p>
	Multi-Sensor (MUSE) – Thermal & Visual Animal Detection System (TVADS)	<p>Système combinant un radar horizontal et des caméras thermiques et/ou visuelles.</p> <p>Lorsque le radar détecte un objet, les caméras sont directement orientées sur l'objet et enregistre le passage.</p>	<p>Capable de gérer quatre éoliennes et de détecter des oiseaux marins à 6 km et de le suivre sur 1 km.</p>	<p>Capable de suivre une petite chauve-souris sur 150 m.</p>	<p>Système sans caméra thermique installé sur des parcs éoliens offshore au Royaume uni et au états unis.</p>	<p>Lagerveld <i>et al.</i> 2020,</p> <p>Skov comm. pers 2019</p>

	DHI					
	Thermal Stereo Vision Application (TSVA)	Système utilisant des caméras thermiques et visuelles en stéréo combiné avec un microphone ultrason positionné à trois hauteurs différentes contenant chacun quatre microphones.	Mesure du suivi en vol des chauves-souris avec la configuration de la caméra stéréo peut être utilisé avec le réseau de microphones ultrasoniques pour l'identification des espèces et l'évaluation des performances des trajectoires de vol estimées		Des améliorations et tests complémentaires sont nécessaires.	Lagerveld <i>et al.</i> 2020, Lagerveld <i>et al.</i> 2017A
	Détection de Collision d'Animaux (DECAN)	Système de détection suivant l'activité des chiroptères, oiseaux et insectes centimétriques à l'aide de caméra et de détecteur acoustique permettant une analyse en temps réel des accidents	Utilisation qui permet de coupler l'analyse du comportement et des collisions pour les chiroptères, les oiseaux et les insectes	Système en cours de développement	Système en cours de développement qui nécessite plus de retour scientifique sur le sujet pour juger de la fiabilité	Biotope 2009
	/	Système de détection avec des capteurs (réseau multi-capteurs) de vibration sur les pales liée aux collisions couplé à un déclenchement caméras en cas de collision détectée. Possibilité d'associer avec des microphones bio-acoustique	Défini les caractéristiques clés pour une détection automatique efficace. Système facilement adaptable Confirmation de l'impact et des espèces par caméra	Système à l'état expérimental mais qui apparait prometteur	Déclenchement d'une caméra suite à la détection de collision via les vibrations est une technique efficace. Taux de réussite estimé à 48,3 %	Hu <i>et al</i> 2017

Tableau 5 : Synthèse bibliographique des dispositifs de suivis de la mortalité envisageables sur des parcs éoliens.

Comme le montre la synthèse ci-dessus, actuellement il est impossible d'estimer le taux de mortalité des chiroptères dans les installations et les technologies pour surveiller l'activité, et évaluer les risques de mortalité sont limités. Il apparait important de suivre l'ensemble des dispositifs dans les années à venir et de s'intéresser aux résultats obtenus afin de choisir le dispositif qui apparaîtra comme le plus fiable et efficace selon les publications scientifiques au moment de la mise en exploitation des parcs éoliens.

L'ensemble de ces différentes études nous permettent cependant de définir des exigences à respecter pour le choix du dispositif à mettre en place :

- Détecter des objets volants qui approchent : détection des chauves-souris de nuit, dans diverses conditions météorologiques ;
- Identifier les objets volants : chauves-souris ou oiseaux en filtrant les insectes ou les artéfacts ;
- Enregistrer les séquences dans les zones balayées par le rotor : de nuit, multiplier les angles de couvertures pour couvrir l'ensemble du rotor ;
- Enregistrer des sons ou cris : détection à ultrasons pour les chiroptères ;
- Identifier les espèces de chauves-souris ;
- Évaluer la collision et/ou le barotraumatisme : enregistrer l'évènement d'une mortalité, évaluer un décès en enregistrant une chute de cadavre ;
- Ne pas modifier le comportement ou risque de mortalité des chauves-souris.

3.5.2 Suivi comportemental

Parallèlement au suivi de la mortalité, un suivi comportemental est généralement réalisé sur les parcs éoliens afin de mieux comprendre le comportement des espèces et de pouvoir comparer ces résultats avec la mortalité observée au sol et de réduire au mieux les impacts induits. Le tableau suivant présente les dispositifs utilisables lors des suivis comportementaux au niveaux des éoliennes.

Type de dispositif de dissuasion	Référence du dispositif	Détails du dispositif	Points positifs	Points négatifs	Efficacité	Publication
Système acoustique monté sur nacelle	Batcorder De EcoObs		Détecteurs / enregistreurs associés à un logiciel d'identification automatique Très bonne qualité sonore Faible consommation électrique Bonne détectabilité Plus spécialisé en éolien (opérationnel, autonomie, suivi, récupération de données à distance)	Limite de détection sur les basses fréquences pouvant filtrer des espèces Nécessité d'intervenir en nacelle d'éolienne		Barataud 2023 Beucher <i>et al.</i> 2022 Adams et al. 2012
	AR125 / AR180		Acquisition directe par ordinateur accompagné par	Pas de téléchargement des sons à distance		Barataud 2023

	De Binary Acoustic Technology		un petit boîtier avec faible consommation Maniable avec PC ultra portable Bonne qualité sonore			
	Anabat avec DTBat De Titley Electronic		Présence d'un affichage. Logiciel de tri automatique des signaux avec Analoop Enregistrement interne GPS, thermomètre, hygromètre	Mauvaise qualité sonore en hétérodyne Mauvaise détectabilité		Barataud 2023 Adams <i>et al.</i> 2012
	SM2 / SM3 / SM4 De Wildlife acoustics		Dérivé d'un enregistreur dédié aux sons audibles Enregistrements sur plusieurs canaux simultanés pour le SM2 et SM3 Déclenchement automatique sophistiqué Programmation modulable avec les différents filtres Traitement possible des sons par des logiciels automatiques Possibilité d'intervenir au sol avec un micro déporté	Qualité sonore moyenne Consommation électrique assez élevée Stockage de sons limité à la quantité de carte SD Pas de téléchargement des sons à distance		Barataud 2023 Beucher <i>et al.</i> 2022 Juilien 2011
	Batlogger De Elekon		Détecteurs / enregistreurs associés à un logiciel d'identification automatique Maniable avec un GPS intégré Bonne qualité sonore	Sortie audio en expansion de temps x10 Consommation électrique assez élevée Nécessité d'intervenir en nacelle d'éolienne		Barataud 2023 Beucher <i>et al.</i> 2022 Adams <i>et al.</i> 2012

			<p>Bonne détectabilité</p> <p>Plus spécialisé en éolien (opérationnel, autonomie, suivi, récupération de données à distance)</p>			
	<p>BATmode (Avisoft) De Bioactoutictechnology</p>		<p>Dispositif complet pouvant être équipé jusqu'à 4 micros</p> <p>Système de communication à distance</p> <p>Test du micro quotidien</p> <p>Bonne détectabilité</p> <p>Plus spécialisé en éolien (opérationnel, autonomie, suivi, récupération de données à distance)</p> <p>Ajustement des seuils au bruit ambiant</p>	<p>Nécessité d'intervenir en nacelle d'éolienne</p>		<p>Beucher <i>et al.</i> 2022</p> <p>Adams <i>et al.</i> 2012</p>
	<p>SMART System De Wildlife Acoustic</p>		<p>Dispositif complet pouvant être équipé jusqu'à 3 micros</p> <p>Plus spécialisé en éolien (opérationnel, autonomie, suivi, récupération de données à distance)</p> <p>Présence d'un capteur micro de secours</p> <p>Système chauffant pour la condensation et le gel</p> <p>Blindage électromagnétique</p> <p>Possibilité de connexion au SCADA pour régulation en direct</p>	<p>Dispositif récent peu de retour sur les installations et la fiabilité du système</p>		<p>Biotope Wildlife Acoustics</p>

			Tri des sons en temps réel via kaleidoscope		
	TRAGUS De Biotope		Dispositif complet pouvant être équipé jusqu'à 4 micros Système de communication à distance	En cours de développement	Biotope
Dispositifs combinés	TrackBat – BatCam et BatSon	Suivi par caméras infrarouges et enregistreurs ultrason du comportement des chiroptères		En cours de développement	Sens Of Life

Tableau 6 : Synthèse bibliographique des dispositifs de suivi comportemental envisageables sur des parcs éoliens.

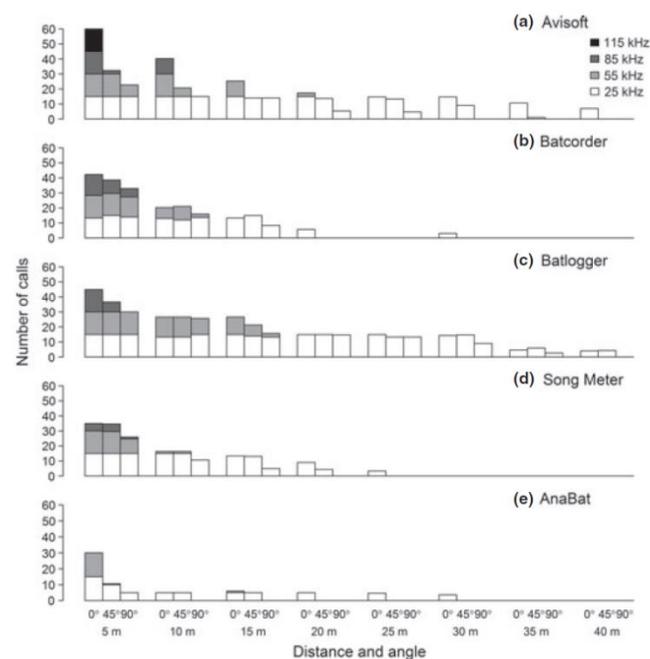


Figure 2: Analyse comparative des capacités de détection des principaux enregistreurs à ultrasons, selon la distance, l'angle d'émission et les différentes plages de fréquences ultrasonores (Adams & al. 2012)

	Anabat Swift ¹	ecoObs GSM Batcorder	elekon Batlogger WE X	Bioacoustic-technology BATmode	Wildlife Acoustics SM4	Wildlife Acoustics SMART
Microphone						
Max. number of microphones	1	1	8	4	2	3-6
Omnidirectional ²	+ ³	+ ³	+ ³	+ ³	+ ³	+ ³
Heating ⁴	-	-	-	+	-	+
Calibration ⁵	-	+	+	+	-	-
Digital signal transfer ⁶	+/- ⁷	-	+/- ⁷	+/- ⁷	+/- ⁷	+
Remote sensitivity check ⁸	- ⁹	+	+	+	-	+/- ¹⁰
Broad band test signal ¹¹	-	-	+ ¹²	+	-	+/- ¹³
Trigger						
Fixed threshold (dB SPL) ⁵	+/- ¹⁴	54, 60, 66, 69 ¹⁵	37 ¹⁶	37 ¹⁶	+/- ¹⁷	+/- ¹⁷
Frequency analysis based on FFT ¹⁸	+/- ¹⁹	+/- ¹⁹	+	+	+	+
Complex bat call filter ²⁰	- ²¹	- ²¹	+	+	+/-	+
Transparent trigger settings ²²	+	-	+	+	+	+

Figure 3: Caractéristiques des détecteurs acoustiques couramment utilisés pour enregistrer les chauves-souris à la nacelle des éoliennes (Behr et al. 2023) (+ = possède la fonctionnalité, - = ne possède pas la fonctionnalité, +/- = possède partiellement la fonctionnalité)

	Anabat Swift	ecoObs GSM Batcorder	elekon Batlogger WE X	Bioacoustic-technology BATmode	Wildlife Acoustics SM4	Wildlife Acoustics SMART
data backup						
backup in device ²³	-	-	+	+	-	+
backup in cloud ²⁴	+ ²⁵	+ ²⁵	+	+	-	+
history log file ²⁶	+/- ²⁷	+/- ²⁸	+	+	+/- ²⁹	+
remote control						
Remote access via	(Ethernet, LTE, satellite) ²⁵	SMS (Ethernet, WIFI, LTE) ²⁵	Ethernet, WIFI, LTE, SMS	Ethernet, WIFI, LTE, SMS	-	Ethernet, WIFI, LTE, SMS
full remote access ³⁰	+ ²⁵	+ ²⁵	+	+ ³¹	-	+
daily status message	-	+	+	+	-	+
connectivity						
Plug in point for meteorological sensors	-	- ³²	+/- ³³	+	+	+

Figure 4: Comparaisons entre la sauvegarde des données du détecteur, la télécommande et la connectivité des différents détecteurs acoustiques. (Behr et al. 2023)



4 CONCLUSION ET DISCUSSION

Cette étude permet de mieux appréhender les différents dispositifs disponibles pour inventorier les chiroptères tant lors des inventaires pré-implantation que lors des suivis post-implantation des parcs éoliens.

Dans un premier les écoutes actives et passives au sol comme en hauteur lors des inventaires de l'étude d'impact permettent d'obtenir des résultats qualitatifs et quantitatifs pour mieux comprendre le comportement des chiroptères et ainsi dimensionner les mesures nécessaires à la construction et l'exploitation du parc éolien.

Dans un second temps, plusieurs dispositifs permettent la régulation des éoliennes en faveur des chiroptères. Beucher *et al.* 2023 dans le cadre du programme ORPECH a permis d'identifier les différents avantages et contraintes des modes de régulations comme le détail la figure suivante.

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

Figure 5: Tableau des principaux avantages et contraintes identifiés des différents types de modes de régulation (Beucher *et al.* Orpech 2022)

Les systèmes de dissuasions ont également été analysés, afin de pouvoir connaître leurs fonctionnements et d'étudier les possibilités de les combiner avec d'autres dispositifs.

Enfin, les systèmes de suivi de la mortalité et du comportement post-implantation ont également fait l'objet d'une analyse afin de mieux comprendre les différents types de fonctionnement. Ces pistes s'avèrent prometteuses pour la préservation des chiroptères dans le cadre de l'implantation de parcs éoliens onshore et offshore.

La majorité des dispositifs présentés dans cette veille technique et scientifique font cependant l'objet d'un manque crucial de retour d'expérience. En effet, ces technologies étant en plein développement, le nombre d'installations, notamment pour les systèmes de dissuasion, de détection-réaction et de suivi reste particulièrement limité pour pouvoir en juger l'efficacité.

Ainsi, il apparaît important et nécessaire de suivre le développement et les retours d'expériences sur l'ensemble de ces dispositifs dans les années à venir, et de surveiller les nouvelles technologies qui pourraient être développées pour une meilleure prise en compte des chiroptères dans le cadre du développement et de l'exploitation de parcs éoliens. Ces systèmes pourraient permettre à l'avenir une meilleure connaissance et une meilleure préservation des espèces de chiroptères susceptibles d'être impactées par l'implantation croissante de parcs éoliens.

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.
- Ahlén, I., H.J. Baagøe & L. Bach (2009): Behaviour of Scandinavian bats during migration and foraging at sea. *Journal of Mammalogy* 90 (6): 1318-1323.
- Ahlén, I., L. Bach, H.J. Baagøe, & J. Pettersson (2007): Bats and offshore wind turbines studied in southern Scandinavia - Report (Nr. 5571) to the Swedish Environmental Protection Agency, 37 pages.
- Arnett, E.B., R.M.R. Barclay & C.D. Hein (2013a): Thresholds for bats killed by wind turbines. *Frontiers in Ecology and the Environment* 11: 171–171. doi:10.1890/15409295-11.4.171
- Arnett, E.B., M.M.P. Huso, M. Schirmacher & J.P. Hayes (2011): Altering turbine speed reduces bat mortality at wind-energy facilities. *Front Ecol. Environ.* 2011, 9(4): 209– 214.
- Baerwald, E.F. & R.M.R. Barclay (2009): Geographic variation in activity and fatality of migratory bats at wind energy facilities. *Journal of Mammalogy*, 90(6): 1341–1349.
- Barataud, 2023. Avis comparatif sur les détecteurs d'ultrasons (usage manuel selon la méthode naturaliste d'écologie acoustique). *Ecologie acoustique*
- Barataud, M. 2021. Test comparatif entre deux enregistreurs audio passifs : l'AudioMoth et le PassiveRecorder. Rapport 4p.
- Behr, O., Brinkmann, R., Hochradel, K., Mages, J., Korner-Nivergekt F., Niermann, I., Reich, M., Simon, R., Weber, N., & Nagy, M. 2017. Mitigating bat mortality with turbine-specific curtailment algorithms: a model based approach. *Wind Energy and Wildlife Interactions*, DOI 10.1007/978-3-319-51272-3_8
- Bennett, V., & Hale, A. (2018). Texturizing wind turbine towers to reduce bat mortality. U.S. Department of Energy, DE-EE0007033.
- 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.
- Beucher, Y., V. Kelm, F. Albespy, M. Geyelin, L. Nazon & D. Pick (2013): Parc éolien de Castelnau-Pegayrols (12): Suivi pluriannuel des impacts sur les chauves-souris. Bilan des campagnes des 2ème, 3ème et 4ème années d'exploitation (2009-2001), 111 pages
- Brabant, R., Laurent, Y., Poernik, B. J., & Degraer, D. (2019). Activity and behaviour of Nathusius' pipistrelle *Pipistrellus nathusii* at low and high altitude in a North Sea offshore wind farm. *Acta Chiropterologica*, 21(2), 341–348.
- Dowling, Z. R. (2018). Not gone with the wind: Addressing effects of offshore wind development on bat species in the northeastern United States [Dissertation]. University of Massachusetts.
- EUROBATS 2014, EUROBATS Publication Series No. 6: Guidelines for consideration of bats in wind farm projects.
- Geo-Marine, Inc. (2010). Ocean/Wind Power Ecological Baseline Studies, January 2008 - December 2009. Volume II: Avian Studies. New Jersey Department of Environmental Protection, Office of Science.

- Good, R., & Schmitt, R. (2020). A Multi-Sensor Approach for Measuring Bird and Bat Collisions with Offshore Wind Turbines, January 16, 2020.
- Gorresen, P. M., Cryan, P. M., Dalton, D. C., Wolf, S., Johnson, J. A., Todd, C. M., & Bonaccorso, F. J. (2015). Dim ultraviolet light as a means of deterring activity by the Hawaiian hoary bat *Lasiurus cinereus semotus*. *Endangered Species Research*, 28, 249–257.
- Hayes, M. A., L. A. Hooton, K. L. Gilland, C. Grandgent, R. L. Smith, S. R. Lindsay, J. D. Collins, S. M. Schumacher, P. A. Rabie, J. C. Gruver, and J. Goodrich-Mahoney. (2019) A smart curtailment approach for reducing bat fatalities and curtailment time at wind energy facilities. *Ecological Applications* 00(00):e01881.
- Hein, C., & Straw, B. (2021). Proceedings from the State of the Science and Technology for Minimizing Impacts to Bats from Wind Energy. National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5000-78557.
- Hu, C., Albertani, R., & Suryan, R. M. (2018). Wind turbine sensor array for monitoring avian and bat collisions. *Wind Energy*, 21(4), 255–263.
- Hüppop, O., & Hill, R. (2016). Migration phenology and behaviour of bats at a research platform in the south-eastern North Sea. *Lutra*, 59, 5–22.
- Johnson, G.D. & M.D. Strickland (2004): An assessment of potential collision mortality of migrating indiana bats (*Myotis sodalis*) and Virginia big-eared bats (*Corynorhinus townsendii virginianus*) traversing between caves. Technical report prepared for NedPower Mount Storm by WEST, Inc.
- Julien JF, 2011, le SM2 et les nouveaux détecteurs. L'envol des chiros n°10 p.5-6.
- Körner-Nievergelt, F., Brinkmann R., I. Niermann & O. Behr (2013): Estimating Bat and Bird Mortality Occurring at Wind Energy Turbines from Covariates and Carcass Searches Using Mixture Models. *PLoS ONE* 8 (7): e67997. doi:10.1371/journal.pone.0067997
- Lagerveld, S., Noort, C. A., Meesters, L., Bach, L., Bach, P., & Geelhoed, S. C. V. (2020). Assessing fatality risk of bats at offshore wind turbines. Institute for Marine Resources & Ecosystem Studies (IMARES) Wageningen University and Research.
- Lagerveld S., Gerla D., van der Wal J.T., de Vries P., Brabant R., Stienen E., Deneudt K., Manshanden J. & Scholl M., (2018). Spatial and temporal occurrence of bats in the southern North Sea area. Wageningen Marine Research centre), Wageningen Marine Research report C090/17; 52 p.
- Lagerveld, S., Poerink, B. J., de Vried, P., & Scholl, M. (2016). Bat activity at offshore wind farms LUD and PAWP in 2015. Institute for Marine Resources & Ecosystem Studies (IMARES) Wageningen University and Research.
- Lagerveld, S., Poerink, B. J., Haselager, R., & Verdaat, H. (2014). Bats in Dutch offshore wind farms in autumn 2012. *Lutra*, 57, 61–69.
- Martin, C. M. (2015). Effectiveness of operational mitigation in reducing bat mortality and an assessment of bat and bird fatalities at the Sheffield Wind Facility, Vermont [Dissertation]: Texas Tech University.
- Matzner, S., Warfel, T., & Hull, R. (2020). ThermalTracker-3D: A thermal stereo vision system for quantifying bird and bat activity at offshore wind energy sites.
- 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

- Nicholls, B. & P.A. Racey (2007): Bats Avoid Radar Installations: Could Electromagnetic Fields Deter Bats from Colliding with Wind Turbines? PLoS ONE 2(3): e297. doi:10.1371/journal.pone.0000297
- Normandeau Associates (2021). Normandeau Deploys its ATOMTM System Technology off the Coast of Virginia, June 1, 2021. Normandeau Blog Article.
- Romano, W. R., Skalski, J. R., Townsend, R. L., Kinzie, K. W., Coppinger, K. D., & Miller, M. F. (2019). Evaluation of an acoustic deterrent to reduce bat mortalities at an Illinois wind farm. *Wildlife Society Bulletin*, 43(4), 608–618.
- Schirmacher, M. (2020). Evaluating the Effectiveness of an Ultrasonic Acoustic Deterrent in Reducing Bat Fatalities at Wind Energy Facilities–Final Technical Report. Bat Conservation International.
- 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.
- SFEPM (2012). Méthodologie pour le diagnostic chiroptérologique des parcs éoliens. 16 pages.
- Smith, A. D., & McWilliams, S. R. (2016). Bat activity during autumn relates to atmospheric conditions: Implications for coastal wind energy development. *Journal of Mammalogy*, 97(6), 1565–1577.
- Solick, D. I., Pham, D., Nasman, K., & Bay, K. (2020). Bat activity rates do not predict bat fatality rates at wind energy facilities. *Acta Chiropterologica*, 22(1), 135–146.
- Szewczak, J.M. & E.B. Arnett (2008): Field test results of a potential acoustic deterrent to reduce bat mortality from wind turbines. An investigative report submitted to the Bats and Wind Energy Cooperative. Bat Conservation International. Austin, Texas, USA.
- Voigt, C. C., Rehnig, K., Lindecke, O., & Pētersons, G. (2018). Migratory bats are attracted by red light but not by warm-white light: Implications for the protection of nocturnal migrants. *Ecology and Evolution*, 8, 9353–9361
- Weaver, S. P., Hein, C. D., Simpson, T. R., Evans, J. W., & Castro-Arellano, I. (2020). Ultrasonic deterrents significantly reduce bat fatalities at wind turbines. *Global Ecology and Conservation*, 24, e01099
- Whitby, M. D., Schirmacher, M. R., & Frick, W. F. (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.
- 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