



Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY 4.0). La citation de tout ou partie du contenu de cet article doit obligatoirement mentionner les auteurs, l'année de publication, le titre, le nom de la revue, le volume, le numéro de l'article et le DOI.

## Suivis réglementaires de la mortalité dans les parcs éoliens : de l'analyse locale à l'approche intégrée

Camille-Amélie SAND<sup>1</sup>, Brice NORMAND<sup>1</sup>, Christian KERBIRIOU<sup>2</sup>, Kévin BARRÉ<sup>2</sup>, Andreas RAVACHE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ouest-Am' SCOP-SA, 1 rue des Cormiers, 35651 Le Rheu, France.

<sup>2</sup> Centre d'écologie et des sciences de la conservation (CESCO), Muséum national d'Histoire naturelle, Centre national de la recherche Scientifique, Sorbonne Université, Station Marine, Concarneau, France.

Correspondance : Andréas RAVACHE, [andreas.ravache@mnhn.fr](mailto:andreas.ravache@mnhn.fr)

*Face à l'essor de l'énergie éolienne, une question cruciale émerge : comment minimiser son impact sur la faune volante, notamment les chauves-souris et les oiseaux ? En France, un protocole national standardisé encadre la collecte de données depuis 2018, mais sa fiabilité est-elle à la hauteur des enjeux ? Cette étude se penche sur la méthodologie en place pour garantir des estimations de mortalité plus précises et pertinentes.*

### Contexte

La production d'électricité constitue le principal secteur émetteur de gaz à effet de serre dans le monde, représentant 43,8% des émissions totales liées à l'utilisation de combustibles fossiles en 2022 selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE, 2024). L'énergie éolienne, en forte croissance avec un objectif de répondre à plus d'un tiers des besoins énergétiques mondiaux d'ici 2050 (IRENA, 2019)<sup>1</sup>, est une alternative prometteuse pour réduire ces émissions. Cependant, cette source d'énergie n'est pas exempte d'impacts écologiques, en particulier sur les oiseaux et les chauves-souris. Outre les effets indirects des éoliennes tels que la perte d'habitat par répulsion sur les individus et les perturbations comportementales (Barré *et al.*, 2018), les éoliennes sont responsables de mortalité directe par collisions ou barotraumatismes (Frick *et al.*, 2017). Ces mortalités peuvent avoir un impact significatif sur la démographie des populations impactées (Frick *et al.*, 2017).

En France, l'évaluation des incidences de l'éolien sur l'environnement, utilisant l'activité acoustique des chiroptères à hauteur de nacelle comme indicateur du risque de collision, constitue un des outils mis en place pour anticiper les effets des projets éoliens sur les chauves-souris durant la phase pré-implantation (MTE, 2020)<sup>2</sup>. Cette évaluation des incidences est prise en compte lors de l'application de la séquence ERC (Évi-

ter-Réduire-Compenser), qui désigne une hiérarchie d'actions visant à limiter l'impact environnemental des projets, où l'on cherche d'abord à éviter les impacts négatifs, à les réduire lorsqu'ils sont inévitables, et enfin à compenser les effets résiduels sur la biodiversité. Après l'implantation, des suivis par recherche de cadavres autour des éoliennes documentent l'impact sur la faune volante. Les données collectées peuvent servir à adapter les mesures de réduction de mortalité. Cependant, le nombre de cadavres retrouvés ne représente qu'une fraction de l'impact réel de ces infrastructures sur la faune (Smallwood *et al.*, 2018), car il est influencé par une détection imparfaite de l'observateur, la prédation ou la décomposition, ainsi que par l'impraticabilité de certaines parties de la zone de recherche (Smallwood *et al.*, 2018). Pour pallier ces biais, des tests visant à estimer la persistance des cadavres et l'efficacité de recherche des observateurs sont réalisés au sein des parcs éoliens et intégrés dans des estimateurs de mortalité, conformément aux recommandations du protocole de suivi environnemental des parcs éoliens terrestres de 2015, révisé en 2018 (MTES, 2015 ; MTES, 2018)<sup>3</sup>.

1. IRENA : *International Renewable Energy Agency*.

2. MTE : ministère de la Transition écologique.

3. MTES : ministère de la Transition écologique et solidaire.

Le protocole de suivi environnemental des parcs éoliens terrestres recommande l'utilisation d'une équation simplifiée dérivée de l'estimateur de mortalité d'Huso (2011), ainsi que de deux autres estimateurs au choix parmi Erickson, Jones, Korner-Nievergelt, Limpens, Bastos et Dalthorp (MTES, 2015). Il apparaît cependant que les estimateurs proposés par le protocole reposent sur des hypothèses sous-jacentes qui ne sont pas systématiquement respectées, et présentent des limites spécifiques à chaque méthode (Bernardino *et al.*, 2013). Une analyse précédente suggère que la formule de Winkelmann tendrait à surestimer la mortalité, tandis que les formules de Jones et Huso seraient moins influencées par les paramètres de persistance, et fourniraient des résultats plus proches entre eux (Marx, 2017). Enfin, des travaux récents ont montré que la méthode de calcul du temps moyen de persistance, non explicitée dans le protocole 2018, ainsi que la fréquence des suivis peuvent influencer de façon notable les estimations de mortalité (Ravache *et al.*, 2024).

Cette estimation de la mortalité permet d'évaluer l'impact « significatif » des parcs éoliens (MTES, 2018). Cependant, la notion de mortalité significative n'est pas définie dans le protocole, et reste à l'appréciation du porteur de projet, du bureau d'études et des services instructeurs. Pourtant, sa significativité détermine la requête de mesures de réduction supplémentaires par les DREAL<sup>4</sup>. Ces mesures consistent généralement – notamment pour les chauves-souris – à l'arrêt programmé des éoliennes (bridage) dans des conditions météorologiques (vent et température) favorables à l'activité de ces espèces. Pour les oiseaux, des systèmes de détection de l'avifaune (SDA) peuvent être installés pour arrêter temporairement les éoliennes en cas de risque de collision. Les suivis de mortalité à l'échelle d'un parc ont pour objectif premier d'évaluer l'impact des éoliennes sur un site spécifique. Cependant, le suivi sur un site pendant une année permet rarement d'évaluer les impacts à un niveau « populationnel », notamment pour des espèces migratrices. De plus, évaluer les effets cumulés de ces installations à large échelle ou adopter des stratégies d'implantation de futurs parcs éoliens nécessite d'avoir une compréhension globale et donc d'identifier les facteurs influençant la mortalité. La quantité considérable de données récoltées durant ces suivis offre une opportunité inédite de développer des approches intégratives pour mieux comprendre les déterminants de la mortalité et évaluer ses effets cumulatifs sur la faune. Cependant, en raison de la diversité des méthodes statistiques employées pour estimer la mortalité et de la précision variable des différents estimateurs, il est plus robuste de centraliser les données brutes collectées de manière standardisée pour y appliquer une méthodologie uniforme et basée sur des techniques reconnues comme les plus avancées actuellement, afin d'obtenir des estimations de mortalité plus fiables et comparables.

Dans ce contexte, la présente étude a pour objectifs de :  
(i) déterminer si les données issues des rapports de suivi environnementaux, réalisés selon un protocole standar-

disé, permettent d'estimer de manière fiable la mortalité dans les parcs éoliens terrestres et d'identifier les lacunes et les obstacles éventuels à cette démarche ; et (ii) comparer les estimations de mortalité produites dans ces rapports avec celles calculées à l'aide d'un estimateur généralisé et actuellement reconnu comme le plus robuste (l'estimateur GenEst). L'étude a été menée dans le cadre du projet de recherche APOCOPE<sup>5</sup> (Amélioration de la protection des oiseaux et des chauves-souris et optimisation de la production d'énergie éolienne) financé par l'ADEME<sup>6</sup> et mené par le bureau d'études Ouest Am' en partenariat avec le CESCO-MNHN<sup>7</sup>.

## Méthode

### Collecte des données

Les DREAL, en charge de la centralisation régionale des rapports de suivis environnementaux, ont été sollicitées afin de regrouper les rapports de suivi de mortalité des parcs éoliens nécessaires au projet. Un total de 798 rapports de suivi de mortalité de 557 parcs éoliens provenant de 14 régions a été collecté (données collectées avant avril 2024). Ces suivis réglementaires réalisés entre 2019 et 2023 ont été réalisés dans le cadre de la dernière révision du protocole national 2018. Les données d'observation de cadavres, de calendriers de recherche, de surfaces prospectées, de tests de persistance et d'efficacité de recherche contenues dans ces rapports ont été numérisées et bancarisées au plus haut niveau de détail disponible, sous la forme d'une base de données.

### Évaluation de la conformité des rapports au protocole et exploitabilité statistique

Afin de vérifier la conformité des données des rapports au protocole et d'évaluer leur exploitabilité statistique, plusieurs étapes de vérification successives ont été mises en œuvre. Un arbre de décision dichotomique a été construit pour identifier les différents éléments empêchant l'estimation de la mortalité ou des analyses complémentaires (figure 1). Il permet de déterminer à chaque étape le pourcentage de rapports avec des données exploitables, ainsi que ceux permettant de réaliser des analyses plus approfondies. L'exploitabilité des résultats requiert *a minima* des suivis et une rédaction des rapports conformes au protocole : des dates de prospection correctement renseignées, un minimum de 20 prospections par éolienne réalisées *a minima* entre les semaines 20 et 43, une surface de recherche carré de 100 m sur 100 m (1 hectare) ou un cercle d'un rayon de 50 m (0,78 ha), la spécification de l'éolienne concernée par le suivi ainsi que des données brutes fournies ou facilement récupérables sur les sites des DREAL. Ces données concernent : les surfaces prospectées, les tests de persistance des cadavres, les tests d'efficacité de recherche, et les mortalités observées. Il est attendu que ces données soient collectées et documentées conformément au protocole, en réalisant un passage le lendemain du dépôt des cadavres puis deux fois par semaine jusqu'à 14 jours pour le test de persistance ou en veillant à inclure les informations sur la mortalité tant pour les

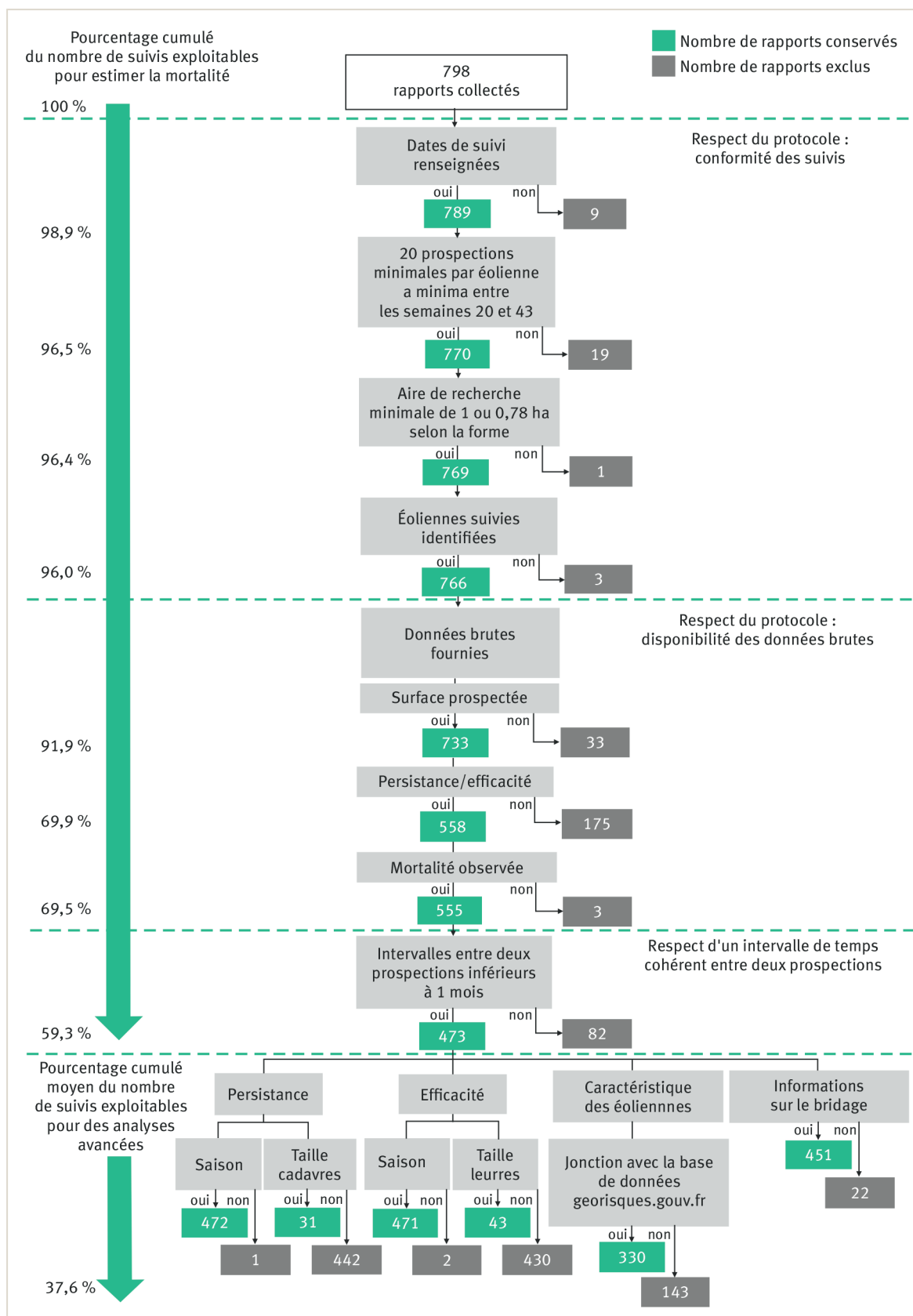
4. DREAL : direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement.

5. APOCOPE : Amélioration de la protection des oiseaux et des chauves-souris et optimisation de la production d'énergie éolienne.

6. ADEME : Agence de la transition écologique.

7. CESCO-MNHN : Centre d'écologie et des sciences de la conservation (CESCO), Muséum national d'Histoire naturelle.

**Figure 1** – Arbre de décision dichotomique permettant d'identifier par étape la conformité de chaque rapport au protocole national de suivi environnemental des parcs éoliens terrestres, ainsi que la possibilité d'estimation robuste de la mortalité et l'étude statistique des facteurs impactant la mortalité de la faune volante sur les parcs. Les chiffres représentent le nombre de chaque rapport respectant (vert) ou non (gris) chaque étape de ce processus. Cet arbre de décision partant des éléments les plus rapides à vérifier vers des éléments plus complexes peut être utilisé comme outil pour vérifier la conformité des rapports.



oiseaux que pour les chauves-souris par exemple. Enfin, sur la base de notre expertise acquise sur les estimations de mortalité (Ravache *et al.*, 2024), nous avons exclu les suivis où les intervalles entre deux recherches de cadavre consécutives sont supérieurs à un mois, produisant ainsi des estimations imprécises. Parmi les rapports exploitables pour le calcul de la mortalité estimée, une partie permet la recherche des facteurs influençant les estimations de mortalité. Il est également possible d'intégrer les caractéristiques des éoliennes, telles que le gabarit, la puissance, le modèle, la date de mise en service et les coordonnées géographiques, en croisant les données de mortalité avec les informations de la base de données publique [georisques.gouv.fr](https://www.georisques.gouv.fr)<sup>8</sup>, et ainsi identifier les facteurs explicatifs des variations de la mortalité. Enfin, l'ajout des données sur le bridage est envisageable ce qui permet d'estimer l'impact de cette mesure sur la mortalité des oiseaux et des chiroptères.

### Comparaison des estimations de mortalité

Nous avons souhaité comparer les estimations de mortalités (oiseaux et chiroptères) produites dans les suivis réglementaires avec celles produites par l'estimateur généralisé GenEst (Dalthorp *et al.*, 2018) considéré comme robuste (Rabie *et al.*, 2021 ; Thurber *et al.*, 2022 ; Ravache *et al.*, 2024). Pour ce faire, nous avons sélectionné aléatoirement 100 rapports exploitables, ayant relevé au moins un événement de mortalité parmi les 798 analysés dans cette étude. L'estimateur GenEst estime la mortalité à partir des observations de cadavres, du calendrier des prospections, d'un modèle statistique de survie décrivant la persistance des cadavres dans le temps, d'un modèle statistique d'efficacité de recherche et d'une estimation de la probabilité qu'un individu touché tombe dans l'aire de recherche. Cette dernière variable a été fixée à 1 dans les modèles, représentant une probabilité de 100 % de tomber dans l'aire de recherche, afin de rester cohérent avec les autres estimateurs utilisés dans les rapports. Le modèle de survie, modélisant la persistance des cadavres dans le temps, a été ajusté avec une famille de distribution statistique de Weibull, montrant le meilleur ajustement du modèle parmi toutes les familles de distribution testées. Un total de 1 000 simulations de la mortalité a été réalisé avec la fonction `estM` du package GenEst. Cela signifie que le calcul de la mortalité a été répété 1 000 fois en utilisant des valeurs aléatoires générées à partir des modèles précédents. Ces valeurs incluent des paramètres comme la probabilité de détection des cadavres, le taux de disparition des cadavres et la proportion de la zone de recherche couverte. La valeur médiane des résultats a été retenue comme estimation de la mortalité d'un parc. Celle-ci a ensuite été ajustée en fonction du nombre d'éoliennes suivies et de la proportion de la surface théorique de recherche qui a été réellement prospectée durant les suivis environnementaux, produisant ainsi une estimation de mortalité par éolienne sur la durée du suivi. Par la suite, la valeur obtenue a été comparée à la moyenne des estimations fournies par les différents estimateurs utilisés dans les rapports pour un même parc, à partir des mêmes données, à l'aide d'un test de Wilcoxon pour échantillons appariés.

### Évaluation de la conformité des rapports au protocole et exploitabilité statistique

Parmi les 798 rapports de suivi de mortalité dans les parcs éoliens récoltés dans le cadre de cette étude, 30,5 % n'ont pas appliqué intégralement le protocole. Si 96 % des suivis semblent avoir respecté la méthodologie requise lors de la collecte des données, les non-respects du protocole se situent principalement sur l'accessibilité des données brutes (figure 1). Les principales non-conformités concernent des éléments tels qu'un nombre de prospections par turbine insuffisant, l'absence d'indications sur la surface réellement prospectée ou encore l'inadéquation des tests de persistance ou d'efficacité. Ces derniers sont parfois présentés sous forme de figures ou de taux moyennés, au lieu de données brutes comme le recommande le protocole, limitant la possibilité d'exploiter les données en utilisant d'autres méthodes d'analyse.

Dans certains cas, les tests de persistance ne sont pas réalisés aux intervalles de passages recommandés ou sont réalisés avec un nombre de cadavres insuffisant. Tous ces éléments empêchent d'estimer la persistance à partir des données issues des rapports.

Parmi les suivis collectés respectant le protocole, 10,2 % présentent un ou plusieurs intervalles de temps supérieurs à un mois entre deux prospections consécutives, affectant la précision des estimations. En effet, des estimations de mortalité largement supérieures au nombre de cadavres observés ont été obtenues en utilisant GenEst lorsqu'au moins un intervalle de plus de 30 jours était observé entre deux prospections consécutives (note : ces rapports n'ont pas été utilisés lors des comparaisons des estimations de mortalité ci-après). Les estimateurs décrits dans le protocole (MTES, 2015 ; MTES, 2018) semblent moins sensibles à ce genre de discontinuités dans les suivis, puisqu'ils sont généralement basés sur un intervalle moyen.

Une telle discontinuité dans les suivis représente cependant un non-respect des conditions d'application de ces formules. Pourtant, aucune fréquence de suivi obligatoire n'est clairement indiquée dans le protocole actuel. Ainsi, en tenant en compte de ce critère d'intervalle de temps inférieur à un mois, ce sont 59,3 % des rapports collectés qui permettent de réaliser des estimations robustes de la mortalité en utilisant GenEst. De plus, 59,1 % permettent d'adapter les modèles de probabilité de persistance avec la saison, et seulement 3,9 % avec la taille des cadavres.

Concernant la modélisation de la probabilité d'efficacité de recherche 59,0 % des rapports permettent d'évaluer l'effet de la saison mais seulement 5,4 % permettent de considérer l'effet de la taille des leurres<sup>9</sup> utilisés lors des tests d'efficacité. Enfin, 41,4 % et 56,5 % des rapports permettent l'étude de la mortalité en fonction respectivement, des caractéristiques des éoliennes et des informations sur le bridage. Au final, une moyenne de 37,6 % des rapports collectés permet donc de réaliser des analyses avancées de la mortalité (figure 1).

8. <https://www.georisques.gouv.fr/donnees/bases-de-donnees/eolien-terrestre>

9. Poussin, souris, peluche, bout de chiffon utilisés lors des tests d'efficacité.

## Comparaison des estimations de mortalité

La comparaison des estimations de mortalité issues de cent rapports choisis aléatoirement révèle que les moyennes des estimations ( $\pm$  Erreur Standard (ES)) produites par les différents estimateurs présentés dans ces rapports sont statistiquement plus élevées ( $p < 0,001$ , figure 2) que celles calculées avec GenEst, tant pour les chiroptères (rapports:  $6,70 \pm 1,56$ , GenEst:  $3,53 \pm 0,42$  individus/suivi/éolienne) que pour les oiseaux (rapports:  $10,80 \pm 1,59$ , GenEst:  $6,00 \pm 0,63$  individus/suivi/éolienne). Il est important de noter que ces estimations de la mortalité sont issues d'un échantillon aléatoire excluant les mortalités nulles, et leur représentativité spatiale et temporelle n'a pas été testée. Ainsi, elles ne reflètent pas la mortalité moyenne nationale. Bien que les estimations de GenEst soient en moyenne plus faibles, la tendance à la surestimation (66,2%) par les formules classiques n'est pas systématique et des cas de sous-évaluation sont aussi constatés (26,3%). Les formules présentées dans les rapports produisent parfois des estimations irréalistes de mortalité, expliquant ces écarts. Plus les estimations produites dans les rapports sont élevées, plus elles tendent à s'éloigner des estimations produites par GenEst. Ce dernier estimateur étant reconnu comme le plus performant, ces résultats suggèrent que les estimateurs classiques peuvent engendrer d'importantes surestimations et sous-estimations de la mortalité. Bien qu'une surestimation puisse sembler être une approche conservatrice, dans un contexte de tension entre décarbonation du secteur de la production d'énergie et actions pour lutter contre l'érosion de la biodiversité, il nous semble important de tendre vers l'estimation la plus juste pour quantifier l'impact sur la mortalité. Enfin, des estimations de mauvaise qualité entravent la compréhension des facteurs influençant la mortalité et compliquent l'évaluation des mesures de réduction.

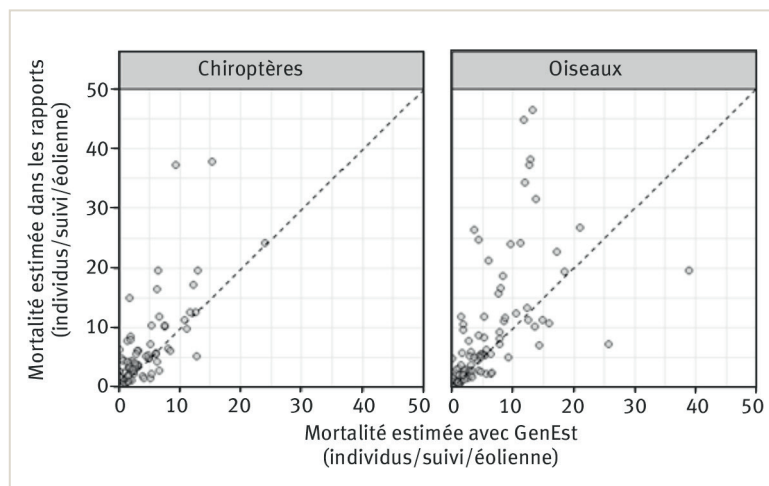
Certains cadavres ne sont identifiés que jusqu'au genre, voire au taxon, en raison de l'état de dégradation du cadavre, des compétences des personnes réalisant les suivis ou de l'absence d'autorisation de déplacement d'espèces protégées. Il est à noter également que certains rapports fournissent uniquement les observations de mortalité d'oiseaux ou uniquement des chauves-souris. Enfin, certains rapports ne fournissent pas les données brutes sur la surface réelle prospectée, ni sur les tests de persistance et d'efficacité de recherche sous forme de données brutes comme l'exige le protocole, bien que certains éléments du rapport aient permis de déduire ces données par le biais de calculs. Par conséquent, le nombre de suivis classés ici comme « non conformes au protocole » est en réalité sous-estimé.

## Recommandations

### Respect du protocole

La France est un des rares pays à s'être doté d'un cadre méthodologique standardisé pour les suivis environnementaux éoliens post-construction, inspirant d'autres pays européens. Ce protocole national constitue une opportunité précieuse, puisqu'il a certainement contribué à homogénéiser les pratiques. On constate que 96% des dossiers présentent une conformité vis-à-vis de la méthodologie du suivi de mortalité, comme le nombre

**Figure 2** – Comparaison entre les moyennes des estimations produites par les différents estimateurs dans les rapports et la mortalité estimée avec GenEst à partir des mêmes données pour les chiroptères et les oiseaux (individus/suivi/éolienne,  $n = 100$ ). Les points situés au-dessus de la ligne indiquent des mortalités estimées dans les rapports plus élevées que les mortalités estimées avec GenEst. Sous la ligne, les mortalités estimées dans les rapports sont inférieures à celles calculées avec GenEst. Plus la mortalité augmente, plus l'écart entre les méthodes tend à croître.



de prospections recommandées, le nombre d'éoliennes suivies ou la surface prospectée. Ce protocole a également contribué à augmenter la qualité des suivis de mortalité. Par exemple, parmi les suivis post-protocole de 2018, seuls 1% omettent la date et 4% la surface prospectée, contre respectivement 7% (Goislot, 2021) et 12% (Coly *et al.*, 2017) dans les études antérieures.

Cette amélioration de la qualité des suivis environnementaux ne doit pas masquer la part considérable de suivis non conformes au protocole 2018, sur les critères liés à la disponibilité des données. En effet seuls 69,5% des suivis fournissent les données brutes pour permettre de réaliser les estimations de mortalité robustes de manière indépendante, avec les outils les plus à jour.

Sur la base de ces résultats, nous recommandons que tous les acteurs (bureaux d'études, associations et services de l'État) fournissent les données à chacune des étapes mentionnées dans la figure 1 de la présente étude *a minima* jusqu'à la ligne « respect d'un intervalle de temps cohérent entre deux passages » incluse. Cette figure offre un exemple de processus de vérification pouvant être repris par les bureaux d'études, associations ou services instructeurs.

### Amélioration du protocole

Pour améliorer la précision des estimations de mortalité, il serait néanmoins utile d'améliorer la rigueur et la précision du protocole de suivi de 2018. Celui-ci devrait exiger que les dates de suivi soient renseignées, même en l'absence d'observation de cadavres. Cela garantirait le respect des 20 prospections par éolienne, et permettrait de structurer le calendrier de recherche, essentiel à l'estimation robuste de la mortalité. Des prospections régulières devraient également être exigées, idéalement espacées d'une semaine minimum, sans jamais dépasser un intervalle de plus de deux semaines.

Le protocole français laisse une certaine liberté méthodologique sur la zone de prospection : au choix un carré de 100 m de côté (ou deux fois la longueur des pales pour les éoliennes présentant des pales de longueur supérieure à 50 m) ou un cercle de rayon égal à la longueur des pales avec un minimum de 50 m. Ainsi, les deux surfaces proposées n'échantillonnent pas la même surface. On peut s'interroger sur la raison d'une telle flexibilité, sachant qu'il a été établi par d'autres études que la relation entre la surface prospectée depuis le centre et le nombre de cadavres n'est pas linéaire (Huso *et al.*, 2014 ; Huso *et al.*, 2023) et que cette différence génère ainsi une potentielle source d'hétérogénéité entre études. Ainsi, il serait préférable de proposer une forme de prospection unique. Bien que la forme circulaire présente l'avantage d'échantillonner des zones à distance égale de l'éolienne, une surface de recherche de forme carrée est plus facilement réalisable sur le terrain.

Le protocole devrait imposer que les rapports incluent les dates de réalisation des tests de persistance et d'efficacité de recherche ainsi que la taille et le type de cadavres et de leurres utilisés, afin de permettre l'intégration de ces facteurs dans les estimations de mortalité. Le protocole actuel est assez flexible en ce qui concerne la fréquence de passage lors des suivis de persistance. Or, des études basées sur le suivi en temps réel de la persistance et sur des simulations de passage ont montré que cette flexibilité entraîne une imprécision et un biais dans les estimations de mortalité (Ravache *et al.*, 2024). Des passages plus réguliers, et si possible plus fréquents permettraient de réduire les biais et d'améliorer la précision des estimations. Les tests de persistance étant relativement chronophages, nous proposons la solution du recours à des pièges photographiques. Cette solution a été testée dans le contexte du test de pertinence des cadavres et a révélé son efficacité à produire des estimations fines du temps de persistance, élément clé des estimations de mortalité (Ravache *et al.*, 2024).

Étant donné l'existence d'un site régulièrement mis à jour regroupant les métadonnées de chaque éolienne associée à un identifiant unique<sup>10</sup>, le protocole devrait également exiger que les noms des parcs et les identifiants associés des éoliennes soient fournis dans les rapports de suivi de mortalité.

Actuellement, le protocole permet aux bureaux d'études de choisir parmi différents estimateurs. Nous recommandons vivement l'utilisation de GenEst, car l'utilisation de plusieurs formules engendre des estimations variées qui créent une incertitude sur l'évaluation des enjeux. En revanche, la procédure GenEst identifie la meilleure modélisation et produit une estimation unique avec son intervalle de confiance. D'autre part, des études ont déjà prouvé la faiblesse de certains estimateurs proposés dans le protocole national (Marx, 2017 ; Bernardino *et al.*, 2013), et l'étude actuelle a révélé des différences entre les moyennes des estimations de mortalité obtenues avec ces estimateurs et celles réalisées avec l'estimateur international GenEst. Ce dernier est reconnu comme le meilleur estimateur disponible (Rabie *et al.*, 2021 ; Thurber *et al.*, 2022) et s'est montré performant même avec des données irrégulières entre les suivis (Ravache *et al.*, 2024), ce qui est fréquent dans les suivis réglementaires.

Enfin, GenEst, produit par l'agence gouvernementale de l'environnement des États-Unis (USGS), est un logiciel libre, pour lequel un guide utilisateur est déjà disponible, ce qui facilite sa prise en main (Simonis *et al.*, 2018). Dans le cas où la formule d'Huso, telle qu'elle est présentée dans le protocole national, continue à être employée, il est essentiel que le temps de persistance moyen soit calculé à partir de la médiane entre la date de dernière présence et la date de première absence observée du cadavre (pour des informations plus détaillées, voir Ravache *et al.*, 2024).

Enfin, le protocole devrait faire mention d'une compétence avérée des observateurs à la détermination des oiseaux et des chauves-souris, et faciliter l'obtention des dérogations pour le transport des espèces protégées mortes, par exemple en délivrant des habilitations par organisme en charge de ces suivis. La bancarisation des cadavres est notamment une action encouragée par le Plan national d'action en faveur des chiroptères. Plusieurs structures réparties sur le territoire national sont en mesure de conserver ces cadavres, permettant d'améliorer la précision des résultats et autorisant d'autres types d'analyses futures comme l'identification des aires de provenances des individus à partir des isotopes stables (Voigt *et al.*, 2012).

### Partage et stockage des données

La coopération des DREAL dans le cadre du programme de recherche a été importante avec un délai de réponse de quelques jours à quelques semaines pour obtenir les rapports. Certaines régions ont déjà mis en place des procédures pour leur mise en ligne, et il est nécessaire d'homogénéiser ces pratiques à l'échelle nationale. Un progrès important a été noté dans la transmission de ces rapports depuis 2014 : alors que seuls, 6,8% des suivis post-implantation (Coly *et al.*, 2017) étaient accessibles, une part bien plus significative l'a été pour cette étude, bien que la quantification exacte reste imprécise.

Cependant, des obstacles persistent, notamment l'accès aux données brutes, empêchant l'intégration complète des suivis potentiellement de bonne qualité. De plus l'absence d'archivage sous forme de tableur ou de base de données entraîne un temps considérable de retranscription. À titre d'exemple cette étude de 798 dossiers a nécessité environ 700 heures de travail, avec une très forte variabilité entre rapports en fonction de la quantité de données exploitables. Nous recommandons de structurer les données de suivi de mortalité selon les principes FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*), qui décrivent comment organiser les données pour les rendre plus faciles à trouver, accessibles, interopérables et réutilisables par des tiers (Wilkinson *et al.*, 2016). Le téléversement de ces données garantirait leur gestion homogène en assurant la cohérence des entrées. Il permettrait d'automatiser les calculs d'estimation de la mortalité, simplifiant ainsi le travail des bureaux d'études. Un système centralisé simplifierait le calcul des effets cumulés et rendrait le traitement des informations aussi accessible qu'une utilisation de GenEst, indépendamment du niveau de compétence en statistique. En outre, il offrirait aux autres organismes un accès aux données pour vérification et analyse, conformément aux principes FAIR.

10. <https://www.georisques.gouv.fr/donnees/bases-de-donnees/eolien-terrestre>

La loi pour la reconquête de la biodiversité (8 août 2016) a introduit la plateforme DEPOBIO pour le dépôt des données brutes de biodiversité, mais celle-ci ne permet que l'enregistrement des informations espèces/localité/date, sans les métadonnées cruciales. Pourtant, un standard pour les données chauves-souris et avifaune des suivis éoliens a été élaboré en partenariat avec l'ADEME et est disponible depuis 2019 (Barré *et al.*, 2020). Nous ne pouvons que recommander la mise à jour de DEPOBIO pour une bancarisation complète des données nécessaires à l'estimation de la mortalité.

## Conclusion

Cette étude visait d'une part, à évaluer la faisabilité d'une estimation homogène et robuste de la mortalité à l'échelle nationale en utilisant les données des rapports de suivi environnementaux des parcs éoliens terrestres, et d'autre part, à comparer les estimations fournies par les suivis avec les nouvelles estimations recalculées avec l'estimateur Genest, connu comme le plus performant à ce jour.

La principale limite rencontrée reste l'accessibilité aux données brutes. Celles-ci demeurent encore dans une large proportion non fournies, ce qui empêche de réaliser rétrospectivement des estimations de mortalité non biaisées pour près de 40 % des suivis. De plus, bien que le respect du protocole soit primordial, quelques points de précision mériteraient d'être apportés afin d'améliorer la qualité des données et les analyses qui en découlent, sans pour autant alourdir la collecte de données sur le terrain. Il est notamment crucial de mettre à jour les méthodes d'estimation de la mortalité pour qu'elles soient plus robustes et mieux adaptées à la comparabilité entre études, telle que l'utilisation de l'estimateur GenEst. Le téléversement des données sur une base de données nationale favoriserait leur standardisation, leur accessibilité et leur valorisation, ouvrant la voie aux évaluations des effets cumulés. Enfin les autres types de projets d'aménagement pourraient être dotés d'un cadre méthodologique similaire pour augmenter la standardisation des données produites par les suivis réglementaires. ■

## RÉFÉRENCES

- AIE (2024). Greenhouse Gas Emissions from Energy Data Explorer. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer>
- Barré, K., Le Viol, I., Bas, Y., Julliard, R., & Kerbiriou, C. (2018). Estimating habitat loss due to wind turbine avoidance by bats: Implications for European siting guidance. *Biological Conservation*, 226, 205-214. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.07.011>
- Barré, K., Kerbiriou, C., Marmet, J., Julien, J. F., Bas, Y., & Tourout, J. (2020). *Mise au point d'un standard de recueil et de transmission des données chauves-souris et avifaune des suivis éoliens : Définition du standard technique et des attributs additionnels – Rapport*. 52 p. [https://plan-actions-chiropteres.fr/sites/default/files/fichiers/l1\\_definition\\_standardeeolienchiropteres\\_mnhn-ademe2020.pdf](https://plan-actions-chiropteres.fr/sites/default/files/fichiers/l1_definition_standardeeolienchiropteres_mnhn-ademe2020.pdf)
- Bernardino, J., Bispo, R., Costa, H., & Mascarenhas, M. (2013). Estimating bird and bat fatality at wind farms: A practical overview of estimators, their assumptions and limitations. *New Zealand Journal of Zoology*, 40(1), 63-74. <https://doi.org/10.1080/03014223.2012.75815>
- Coly, R., Barré, K., Gourdain, P., Kerbiriou, C., Marmet, J., & Tourout, J. (2017). Études chiroptérologiques dans les dossiers réglementaires éoliens: disponibilité de l'information et conformité avec les recommandations nationales et européennes. *Natura*, 3, 1-10.
- Dalthorp, D., Madsen, L., Huso, M., Rabie, P., Wolpert, R., Studyvin, J., Simonis, J., & Mintz, J. (2018). GenEst statistical models—A generalized estimator of mortality. In : *Geological Survey Techniques and Methods*, book 7, chap. A2, 13 p. <https://doi.org/10.3133/tm7A2>
- Frick, W. F., Baerwald, E. F., Pollock, J. F., Barclay, R. M. D., Szymanski, J. A., Weller, T. J., Russel, A. L., Loeb, S. C., Medellin, R. A., & McGuire, L. P. (2017). Fatalities at wind turbines may threaten population viability of a migratory bat. *Biological Conservation*, 209, 172-177. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.02.023>
- Goislot, C. (2021). Mortalité des chiroptères induite par les éoliennes dans le Nord-Ouest de la France : nombre de cas et distribution spatio-temporelle des espèces concernées. *Plume de Naturalistes*, 5, 101-122.
- Huso, M. M. P. (2011). An estimator of wildlife fatality from observed carcasses. *Environmetrics*, 22(3), 318-329. <https://doi.org/10.1002/env.1052>
- Huso, M. M. P., & Dalthorp, D. (2014). Accounting for unsearched areas in estimating wind turbine-caused fatality. *Journal of Wildlife Management*, 78(2), 347-358. <https://doi.org/10.1002/jwmg.663>
- Huso, M. M. P., Dalthorp, D., Mintz, J., Nygård, T., & May, R. (2023). Modeling the Spatial Distribution of Carcasses of Eagles Killed by Wind Turbines. *Journal of Raptor Research*, 57(3), 456-467. <https://doi.org/10.3356/JRR-21-53>
- IRENA (2019). *Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050*. Abu Dhabi : International Renewable Energy Agency – Rapport, 52 p. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Apr/IRENA\\_Global\\_Energy\\_Transformation\\_2019.pdf?rev=6ea97044a1274c6c8ffe4a116ab17b8f](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Apr/IRENA_Global_Energy_Transformation_2019.pdf?rev=6ea97044a1274c6c8ffe4a116ab17b8f)
- Marx, G. (2017). Le parc éolien français et ses impacts sur l'avifaune - Étude des suivis de mortalité réalisés en France de 1997 à 2015. Paris : LPO France. 92 p. [https://eolien-biodiversite.com/IMG/pdf/eolien\\_lpo\\_2017.pdf](https://eolien-biodiversite.com/IMG/pdf/eolien_lpo_2017.pdf)
- MTE (2020). Guide relatif à l'élaboration des études d'impacts des projets de parcs éoliens terrestres - version révisée octobre 2020. [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/Guide\\_EIE\\_MAJ\\_Paysage\\_20201029-2.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/Guide_EIE_MAJ_Paysage_20201029-2.pdf)
- MTES (2015). Protocole de suivi environnemental des parcs éoliens terrestres. <https://www.bulletin-officiel.developpement-durable.gouv.fr/noticpdf;jsessionid=BCF8F72D3773365F4975B49562B8A19?id=Bulletinofficiel-0028950>
- MTES (2018). Protocole de suivi environnemental des parcs éoliens terrestres – révision 2018. [https://eolien-biodiversite.com/IMG/pdf/protocole\\_de\\_suivi\\_revision\\_2018.pdf](https://eolien-biodiversite.com/IMG/pdf/protocole_de_suivi_revision_2018.pdf)

## RÉFÉRENCES (suite)

- Rabie, P., Riser-Espinoza, D., Studyvin, J., Dalthorp, D., & Huso, M. (2021). Performance of the GenEst mortality estimator compared to the Huso and Shoenfeld estimators – Rapport 11p., American Wind Wildlife Institute. <https://rewi.org/resources/genest/>
- Ravache, A., Barré, K., Normand, B., Goislot, C., Besnard, A., & Kerbirou, C. (2024). Monitoring carcass persistence in windfarms: Recommendations for estimating mortality. *Biological Conservation*, 292, 110509. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2024.110509>.
- Simonis, J., Dalthorp, D., Huso, M., Mintz, J., Madsen, L., Rabie, P., & Studyvin, J. (2018). GenEst User Guide models—Software for Generalized Estimator of Mortality. In : *Geological Survey Techniques and Methods*, book 7, chap. C19, 84 p., <https://doi.org/10.3133/tm7C19>. <https://pubs.usgs.gov/tm/7a2/tm7a2.pdf>
- Smallwood, K. S., Bell, D. A., Walther, E. L., Leyvas, E., Standish, S., Mount, J., & Karas, B. (2018). Estimating wind turbine fatalities using integrated detection trials. *Journal of Wildlife Management*, 82(6), 1169–1184. <https://doi.org/10.1002/jwmg.21468>
- Thurber, B. G., Jardine, C. B., & Zimmerling, J. R. (2022). Bat Mortality at Ontario Wind Farms Quantified and Compared Using Four Candidate Estimator Equations. *Human–Wildlife Interactions*, 16(1), 53-56. <https://doi.org/10.26077/0413-08f4>
- Voigt, C. C., Popa-Lisseanu, A. G., Niermann, I., & Kramer-Schadt, S. (2012). The catchment area of wind farms for European bats: a plea for international regulations. *Biological conservation*, 153, 80-86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2012.04.027>
- Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, I. J., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., Blomberg, N., Boiten, J. W., Bonino da Silva Santos, L., Bourne, P. E., Bouwman, J., Brookes, A. J., Clark, T., Crosas, M., Dillo, I., Dumon, O., Edmunds, S., Evelo, C. T., Finkers, R., Gonzalez-Beltran, A., Gray, A. J. G., Groth, P., Goble, C., Grethe, J. S., Heringa, J., 't Hoen, P. A. C., Hooft, R., Kuhn, T., Kok, R., Kok, J., Lusher, S. J., Martone, M. E., Mons, A., Packer, A. L., Persson, B., Rocca-Serra, P., Roos, M., van Schaik, R., Sansone, S. A., Schultes, E., Sengstag, T., Slater, T., Strawn, G., Swertz, M. A., Thompson, M., van der Lei, J., van Mulligen, E., Velterop, J., Waagmeester, A., Wittenburg, P., Wolstencroft, K., Zhao, J., Mons, B. (2016). *Addendum : The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship*. *Scientific Data*, 19(1), 6, <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>