

Rapport final du projet EFFICAS

Etude de l'EFFICAcité des Systèmes de détection-réaction automatiques (SDA) mis en place sur les parcs éoliens terrestres français dans le but de réduire l'impact sur les espèces soumises à Plans Nationaux d'Actions.

Cyrielle Ballester et Aurélien Besnard

Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, Univ Montpellier, CNRS UMR5175, EPHE-PSL University, IRD, Montpellier, France

Financé par les Fonds Verts.



Table des matières

Rapport final du projet EFFICAS.....	1
Introduction.....	3
Méthodes	7
Récolte des données et création d'une base de données	7
Analyses statistiques	9
Résultats	12
Récolte des données et création de la base de données.....	12
Analyses statistiques	13
Discussion	20
Communications.....	23
Financements	23
Bibliographie.....	24
Annexes	28
Annexe 1 : Exemple d'une distribution des mortalités estimées a) brute et b) tronquée avec un seuil de 0.001 puis renormalisée.....	28
Annexe 2 : Résultat des estimations renvoyées par les GLMM sur 1000 tirages de mortalités dans la distribution brute des mortalités estimées (<i>bootstrap</i>) pour les 20 parcs et leurs témoins.	29
Annexe 3 : Résultat des estimations renvoyées par les GLMM sur 1000 tirages de mortalités dans la distribution tronquée des mortalités estimées (<i>bootstrap</i>) pour les 20 parcs et leurs témoins.	30
Annexe 4 : Résultat des estimations renvoyées par le GLMM sur 1000 tirages de mortalités dans la distribution brutes des mortalités estimées (<i>bootstrap</i>) pour les 25 parcs équipés de SDA.	31
Annexe 5 : Résultat des estimations renvoyées par le GLMM sur 1000 tirages de mortalités dans la distribution tronquée des mortalités estimées (<i>bootstrap</i>) pour les 25 parcs équipés de SDA.....	32
Annexe 6 : Listes des espèces d'envergure supérieure à 50 cm (a + b) et supérieure à 100 cm (b). 33	
Annexe 7 : Résultat des estimations renvoyées par le GLMM sur les médianes des distributions tronquées des mortalités estimées pondérées par l'erreur standard pour chacun des 26 parcs sur des espèces de plus de 50 cm d'envergure.....	35
Annexe 8 : Résultat des estimations renvoyées par le GLMM sur les médianes des distributions tronquées des mortalités estimées pondérées par l'erreur standard pour chacun des 26 parcs sur toutes les espèces.	36
Annexe 9 : Résumé des résultats de notre recensement des parcs éoliens équipés de SDA en France en comparaison du recensement réalisé par France renouvelables en avril 2024.....	37
Annexe 10 : Détails des rapports de suivis de mortalité utilisés.....	38
Annexe 11 : Changements de bridage au cours du temps sur les parcs équipés de SDA.....	41

Introduction

La transition énergétique mondiale repose en grande partie sur le déploiement des énergies renouvelables, visant à réduire la dépendance aux énergies fossiles et à limiter le réchauffement climatique (Chum et al., 2011; Teske, 2019). En effet, environ 68 % des émissions mondiales de GES résulte de la combustion d'énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz) et presque 30 % des émissions mondiales de CO₂ résulte de la production d'électricité (World Resources Institute (WRI), 2024). En France, la loi n° 2015-992 du 17 août 2015, relative à la transition énergétique pour la croissance verte, prévoit de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 40 % entre 1990 et 2030 et diviser par quatre ces émissions entre 1990 et 2050 ; de réduire la consommation énergétique finale de 50 % en 2050 par rapport à 2012 en visant un objectif intermédiaire de 20 % en 2030 ; et de réduire la consommation énergétique primaire d'énergies fossiles de 30 % en 2030 par rapport à 2012. Pour atteindre ces engagements, la multiplication des énergies renouvelables (EnR) est essentielle (Tinsley et al., 2023). Fin 2024, la puissance totale du parc électrique renouvelable français s'élevait à environ 76,7 GW (Réseau de Transport d'Électricité (RTE), 2025). Parmi elles, l'éolien représentait 25 GW de capacité installée (23,5 GW terrestre et 1,5 GW en mer), réparties sur 2 536 parcs (Got and Wellenreiter, 2025; Service de la donnée et des études statistiques (SDES), 2025). Les projets éoliens en cours d'instruction totalisent 16,5 GW supplémentaires, illustrant le dynamisme du secteur pour atteindre les objectifs nationaux de transition énergétique (Got and Wellenreiter, 2025).

Toutefois, ce développement a un coût environnemental, notamment en ce qui concerne l'impact des éoliennes sur les écosystèmes et la biodiversité (Drewitt and Langston, 2006; Durá-Alemañ et al., 2023; Katzner et al., 2019; Kuvlesky et al., 2007). Les oiseaux et les chauves-souris figurent parmi les principales victimes de ces infrastructures. Les parcs éoliens provoquent en effet à la fois la fragmentation de leur habitat et leur mortalité directe, en raison des collisions avec les turbines (Gómez-Catasús et al., 2018; Marques et al., 2014). Certains sites enregistrent des mortalités allant jusqu'à 27 oiseaux et 15 chauves-souris par turbine chaque année (Ferrer et al., 2012; Loss et al., 2013; Zimmerling et al., 2013; Zimmerling and Francis, 2016). Plus de 200 espèces d'oiseaux et une trentaine d'espèces de chauves-souris sont concernées (Arnett et al., 2016; Thaxter et al., 2017). Ces pertes peuvent compromettre la viabilité de certaines populations, en particulier celles d'espèces comme les grands rapaces et certaines chauves-souris, caractérisées par une durée de vie longue et une reproduction faible (Beston et al., 2016; Carrete et al., 2009; Duriez et al., 2023; Watson et al., 2018).

Face à cette mortalité aviaire sur les parcs éoliens, différents outils et mesures pour réduire ce risque ont été développés. Un des moyens les plus utilisés est le bridage passif lors de conditions météorologiques ou de périodes particulièrement propices aux déplacements d'oiseaux, comme par exemple les périodes de migration (Liechti et al., 2013; K Shawn

Smallwood and Bell, 2020). Le bridage passif présente cependant le désavantage de laisser à l'arrêt un parc éolien sur un temps cumulé plus long que le temps passé par des oiseaux dans la zone du parc et entraîne donc des pertes de production d'énergie inutiles. Une approche alternative au bridage passif repose sur l'utilisation de bridage actif c'est-à-dire l'arrêt des éoliennes sur demande ou en anglais SDOD pour « Shut Down On Demand ». L'une des méthodes de SDOD consiste à faire appel à des observateurs humains formés, chargés de surveiller l'activité des oiseaux en temps réel et d'ordonner l'arrêt des éoliennes dès qu'ils détectent des trajectoires de vol à haut risque (Ferrer et al., 2022). Cette méthode exige une surveillance humaine continue sur site ainsi qu'une coordination étroite avec les exploitants d'éoliennes. Par conséquent, malgré son efficacité locale avérée, son application à grande échelle ou sur le long terme s'avère complexe, tant sur le plan logistique qu'économique, notamment dans les pays à coût de main-d'œuvre élevé. Une seconde méthode de SDOD est l'installation, sur les parcs éoliens, de systèmes de détection d'oiseaux (aussi appelés SDA : Systèmes de Détection Automatique) couplés à des dispositifs d'effarouchement et/ou de ralentissement des pales (Duerr et al., 2023). Ces dispositifs détectent en temps réel les oiseaux en approche et déclenchent une réponse uniquement lorsque le système estime que la trajectoire présente un risque de collision (Gradolewski et al., 2021; May et al., 2012; McClure et al., 2021). En France, ces systèmes de réduction sont principalement déployés pour réduire les mortalités d'espèces dites « patrimoniales », telles que les grands planeurs (les cigognes, les grues, aigles, etc.) et d'autres espèces faisant l'objet de Plans Nationaux d'Actions concernées par des collisions (faucon crécerellette *Falco naumanni*, vautour fauve *Gyps fulvus*, vautour moine *Aegypius monachus*, milan royal *Milvus milvus*, outarde canepetière *Tetrax tetrax*, etc.).

Malgré la mise en place de ces SDA sur certains parcs, des mortalités par collision sont constatées sur les parcs en question (Huso and Dalthorp, 2023; McClure et al., 2021; McClure et al., 2022). Cette persistance des mortalités pose la question de l'efficacité de ces dispositifs à réduire de manière « significative » les mortalités. De fait, aucune étude globale et précise sur les SDA n'a été réalisée au niveau international afin d'évaluer leurs performances et leur efficacité (Ballester et al., 2024). Ces dispositifs ont fait l'objet de diverses évaluations réalisées par les fournisseurs de système eux-mêmes, par des bureaux d'études mandatés par les opérateurs de certains parcs, mais aussi, dans quelques cas, par des ONGs ou agences gouvernementales (voir par exemple quelques études disponibles publiquement : Aschwanden et al., 2014; Hanagasioglu et al., 2015; May et al., 2012; McClure et al., 2021; McClure et al., 2018). Malgré ces quelques évaluations, il est difficile de tirer des conclusions claires sur la performance et l'efficacité de ces dispositifs. En effet, il a été constaté que ces études reposent sur une grande diversité de protocoles qui, par leur hétérogénéité, ne rendent pas possible une étude comparative des SDA. De plus, ces tests sont principalement réalisés dans des conditions de détection optimale (y compris dans les études publiées dans des revues internationales, voir par exemple McClure et al., 2018), souvent avec de faibles tailles d'échantillons qui ne permettent pas d'apprécier les incertitudes des chiffres avancés (incertitudes qui sont d'ailleurs rarement quantifiées dans les rapports d'étude que nous

avons pu consulter) et parfois avec des protocoles qui ne sont pas adaptés (Corbeau and Besnard, 2021). Par ailleurs, ces évaluations se focalisent quasi-exclusivement sur **les performances des systèmes** (capacité de détection par exemple) et **non sur leur efficacité** (c'est-à-dire sur la réduction des mortalités) alors que de bonnes performances à détecter les oiseaux ne se traduisent pas nécessairement en une grande efficacité.

L'objectif du projet EFFICAS était de conduire une évaluation de **l'efficacité** des systèmes de détection-réaction à l'échelle française en analysant les données disponibles sur l'ensemble des parcs équipés sur le territoire national. Ce projet avait pour but **d'estimer le pourcentage moyen de baisse de mortalité** induit par la mise en place d'un SDA sur un parc. Pour ce faire, le projet s'est organisé en plusieurs étapes :

(i) Le développement de deux bases de données :

- une regroupant toutes les informations issues des suivis de mortalités menés sur les parcs telles que les dates et lieux des suivis, les mortalités constatées sur les parcs, les résultats des tests de persistance des carcasses, ainsi que ceux des tests de détection des observateurs et la surface prospectée,

- une regroupant toutes les informations des parcs équipés de SDA telles que les caractéristiques des SDA, la date de leur mise en fonctionnement et le nombre d'éoliennes du parc équipées.

Ces bases de données ont été alimentées grâce à une analyse détaillée des rapports de suivis des parcs.

(ii) La conduite d'analyses statistiques visant à comparer les mortalités avant et après la mise en place des SDA sur les parcs, ainsi que sur des parcs témoins n'ayant pas été équipés à proximité, afin d'estimer statistiquement l'efficacité des SDA (pourcentage de réduction des mortalités). Ces analyses ont été réalisées à l'aide d'une approche de type Before-After-Control-Impact (BACI), seule méthode considérée comme pertinente pour mettre en évidence l'efficacité d'une mesure de gestion (ou d'une perturbation) (Smallwood and Bell, 2020). Une analyse globale a été menée (tous systèmes et toutes espèces confondues), et, lorsque la quantité de données le permettait, des analyses par système ou par classes de taille d'espèces ont été réalisées.

(iii) Le transfert des connaissances issues des étapes précédentes : les résultats destinés à la filière éolienne et aux services de l'État ont été communiqués à travers ce rapport et des séminaires de restitution. Une publication internationale est actuellement en cours de rédaction.

Cette étude visait à améliorer les connaissances sur les SDA utilisés sur les parcs éoliens pour réduire les collisions d'oiseaux avec les pales des éoliennes, un enjeu particulièrement

important pour les espèces soumises aux PNA et dans le contexte actuel de déploiement important des éoliennes.

Méthodes

Récolte des données et création d'une base de données

La première étape du projet, c'est-à-dire la création et le remplissage d'une base de données regroupant toutes les informations des suivis de mortalité menés sur des parcs équipés de SDA, a été réalisée conjointement avec le projet APOCOPE (Amélioration de la Protection des Oiseaux et des Chauves-souris et Optimisation de la Production d'Énergie Éolienne) (Sand et al., 2024). Ce projet de recherche, financé par l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), est mené par le bureau d'étude Ouest Am' en association avec le laboratoire CESCO (Centre d'Écologie et des Sciences de la Conservation) du MNHN (Muséum national d'Histoire naturelle) afin de répondre aux questions qui se posent sur la planification et le renouvellement des parcs éoliens français au regard de leur impact sur les oiseaux et les chauves-souris.

Ainsi, nous avons développé conjointement la structure de la base de données pour regrouper les informations issues des suivis de mortalités telles que les caractéristiques des éoliennes, les mortalités constatées (chiroptères et oiseaux), les tests de persistance des cadavres réalisés sur les parcs en question et les tests d'efficacité de l'observateur.

La base de données a été alimentée par des stagiaires recrutés dans le cadre d'APOCOPE avec les données brutes issues de tous les rapports de suivis de mortalités récupérés à l'échelle nationale (principalement avec les suivis réalisés depuis 2018 – date de publication de la méthodologie nationale pour la réalisation des suivis environnementaux). Ces rapports sont parfois accessibles en ligne sur des plateformes publiques, et lorsque ce n'était pas le cas, des demandes d'accès aux rapports ont été formulées auprès des Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL). Dans ces rapports, il a fallu retranscrire le planning du suivi des mortalités, les données de mortalités constatées, les données des tests d'efficacité de l'observateur et les données des tests de persistance dans une base de données commune. L'équipe d'EFFICAS a complété cette base de données avec des suivis non saisis par APOCOPE, notamment ceux mis à disposition en ligne après le passage des stagiaires du projet APOCOPE ainsi que les suivis réalisés avant 2018 (qui n'étaient pas étudiés dans le cadre d'APOCOPE).

L'équipe d'EFFICAS s'est aussi occupée de créer la base de données sur les SDA. Les informations concernant les SDA et leur déploiement ont pu être collectées principalement auprès des DREAL qui ont fait un travail de recensement des parcs équipés dans leurs régions/départements. Cela a permis de remplir la base de données avec le nom et localisation des parcs concernés, le nombre d'éoliennes sur les parcs et le nombre d'éoliennes concernées par le SDA, les modèles de SDA, les dates de mise en fonctionnement des SDA et éventuellement les dates de mise à jour des SDA. Dans cette base de données, un

commentaire sur la disponibilité des données nécessaires aux analyses statistiques prévues est ajouté, par exemple si le parc ne dispose pas de rapport de suivi de mortalité avant ou après la mise en place du SDA.

Les analyses statistiques ont été réalisées sur une sélection de parcs dont les données étaient exploitables (colonne *Parcs avec données exploitables* dans le tableau 1). Tout d'abord, les parcs avec la présence de SDA ont été sélectionnés dans la base de données globale (colonne *Parcs équipés de SDA* dans le tableau 1). Ensuite, les parcs ayant uniquement des rapports de suivis de mortalité avant la mise en place du SDA (colonne *Parcs sans suivi « après »* dans le tableau 1) ou au contraire uniquement des rapports de suivis de mortalité après la mise en place du SDA (colonne *Parcs sans suivi « avant »* dans le tableau 1) ont été écartés du jeu de données puisqu'ils ne permettaient pas réaliser la comparaison avant/après SDA nécessaire à une démarche statistique robuste. Quelques autres parcs ont dû être exclus du jeu de données, leurs informations étant inexploitable en raison de l'absence soit de suivi de la mortalité aviaire, soit de données brutes dans les rapports, ou encore de la date de mise en service du SDA (colonne *Parcs avec données manquantes* dans le tableau 1).

Une seconde sélection de parcs a été effectuée sur l'ensemble des parcs français afin d'identifier, pour chaque parc équipé de SDA retenu auparavant, un parc témoin associé. La sélection des parcs témoins s'est d'abord basée sur l'absence de SDA durant les périodes étudiées. Parmi les parcs répondant à ce critère, nous avons ensuite privilégié ceux disposant de données disponibles avant et après les périodes correspondant à celles du parc équipé associé. Enfin, parmi les sites ainsi présélectionnés, nous avons retenu celui géographiquement le plus proche de chaque parc équipé de SDA.

Nous avons regardé les changements de modalité de réduction de la mortalité aviaire sur les parcs éoliens entre les périodes avant et après. Pour trois parcs (Annexe 11) les modalités appliquées sur le SDA (arrêt et/ou de l'effarouchement sonore) ne sont pas explicitées dans les rapports de suivi de mortalité. Des analyses sans ces parcs sont présentées en Annexes 12, 13, 14. Pour tous les autres parcs, à minima un bridage actif a été mis en place avec parfois une mesure complémentaire associée (Annexe 11).

Analyses statistiques

Réaliser une analyse rigoureuse de l'efficacité d'un système de détection automatique (SDA) implique de comparer les mortalités avant et après la mise en place de ce dispositif. Trois approches complémentaires ont été mises en œuvre, utilisant des parcs situés en France :

- une analyse de type Before-After Control-Impact (BACI), c'est-à-dire que l'analyse de mortalité avant/après est réalisée sur le parc équipé d'un SDA ($n = 20$) et sur un parc témoin sans SDA le plus proche possible ($n = 20$) pour tenir compte de changements potentiels dans les abondances d'oiseaux dans la zone avant/après mise en place du SDA (K Shawn Smallwood and Bell, 2020),
- une analyse Before-After (BA), uniquement sur des parcs équipés sans témoin ($n = 25$) permettant de travailler sur un plus grand nombre de parcs,
- et une analyse parc par parc ($n = 26$), permettant d'évaluer les résultats individuels à une échelle plus fine pour mieux examiner les sources de variance potentielle de l'efficacité.

Pour chaque parc du jeu de données et pour chaque année exploitable, les mortalités ont été estimées grâce à l'estimateur GenEst, basé sur un modèle probabiliste reliant le nombre de carcasses observées aux mortalités réelles (Dalthorp et al., 2018). Ce modèle prend en compte la probabilité qu'une carcasse reste détectable dans le temps (persistance) et la probabilité qu'elle soit repérée par les observateurs (détection). Les distributions de persistance sont modélisées par des lois de survie telles que Weibull, lognormale ou loglogistique, tandis que la probabilité de détection peut être ajustée selon certaines covariables via une fonction *logit*. Les paramètres de persistance et de détection sont estimés par maximum de vraisemblance à partir de données expérimentales (tests de persistance et d'efficacité). L'incertitude est ensuite propagée par *bootstrap* paramétrique pour tenir compte de l'incertitude des estimations intermédiaires. L'estimateur GenEst a été implémenté dans le logiciel R (R Core Team, 2022) via le package *GenEst* (Dalthorp et al., 2023).

La détection des mortalités aviaires est généralement un événement rare, et des taux faibles de persistance et de détection peuvent conduire à n'observer aucune carcasse lors des suivis, même si des mortalités surviennent sur le parc (Huso et al., 2015). Pour remédier à cette limite, l'approche Evidence of Absence (EoA) repose sur un estimateur probabiliste similaire à GenEst, prenant en compte la persistance, la détection et l'effort d'échantillonnage (Dalthorp et al., 2017). Cependant, contrairement à GenEst, EoA permet d'estimer la mortalité même lorsque aucune carcasse n'a été détectée. Pour appliquer cette méthode, nous avons utilisé le package *eoA3* (Dalthorp, 2023) dans le logiciel R (R Core Team, 2022).

Les deux estimateurs renvoient des distributions de probabilité du nombre de mortalités, associées à leur incertitude. Ces distributions ont été produites en version brute et en version tronquée (suppression des estimations de mortalités en-deçà d'un seuil de

probabilité fixé à 0,001 pour la troncature afin d'éviter des estimations extrêmement fortes des mortalités mais très peu probables, Annexe 1). Pour les analyses BACI et BA, nous avons utilisé les médianes des distributions brutes, tandis que pour l'analyse parc par parc, nous avons utilisé les médianes des distributions tronquées pour une meilleure lisibilité des résultats.

Concernant les approches BACI et BA, pour chaque parc et période, la médiane de la distribution correspondante a été extraite, ainsi que l'écart type. Ces valeurs médianes ont été utilisées comme variable réponse dans un modèle linéaire généralisé à effets mixtes (GLMM) avec une distribution de type Tweedie et un lien log (Bolker et al., 2009). L'inverse de l'écart type ($1/sd$) des estimations a été utilisée comme poids de ces valeurs afin d'accorder un poids plus faible aux estimations les moins précises. Les variables explicatives du modèle sont la période (avant/après mise en place d'un SDA) et le type de parc (parc avec SDA/parc témoin) en interaction (principe de base du BACI). L'effort de suivi (la durée du suivi multipliée par le nombre d'éoliennes suivies) est pris en compte dans ce modèle via l'utilisation d'un offset (avec une transformation *log*) pour gérer l'hétérogénéité de cet effort entre suivis. Ceci permet de modéliser le nombre de mortalités par jour et par éolienne pour l'ensemble des parcs. L'identifiant du parc et celui du couple parc avec SDA-parc témoin sont inclus en effets aléatoires pour gérer cette combinaison de données non-indépendantes.

Toujours concernant les approches BACI et BA, une analyse complémentaire par *bootstrap* paramétrique a également été réalisée et présentée en Annexes 2, 3, 4 et 5, afin de comparer cette méthode avec celle basée sur les médianes (Efron and Tibshirani, 1985). Ainsi, nous avons bâti 1000 jeux de données, constitués chacun d'un tirage aléatoire dans la distribution des estimations de mortalités de chaque parc avec et sans SDA et avant/après mise en place du SDA. Sur chaque jeu de données ainsi constitué, le même GLMM que pour les médianes est ajusté sans la pondération par l'écart type. Ces analyses ont été conduites à la fois sur les distributions brutes et tronquées.

Concernant l'approche parc par parc, pour chaque parc et période, nous avons tiré 1 000 valeurs aléatoires à partir de la distribution de mortalités estimée puis calculé la médiane et l'intervalle de confiance à 95%. Pour évaluer les différences de mortalité entre les périodes nous avons calculé pour chaque parc la proportion de tirages où la mortalité après était supérieure à la mortalité avant, puis appliqué un test bilatéral ($p\text{-value} = 2 \times \min(\text{proportion}, 1 - \text{proportion})$). Une $p\text{-value} < 0,05$ a été interprétée comme indiquant une différence de mortalité statistiquement significative entre les deux périodes.

L'ensemble de ces analyses statistiques a été conduit sur trois jeux de données différents. Un jeu de données contenant uniquement les mortalités des espèces d'envergures supérieures ou égales à 50 cm, un jeu de données contenant uniquement les mortalités des espèces d'envergures supérieures ou égales à 100 cm (Annexe 6) et un jeu de données contenant les mortalités de toutes les espèces. Pour l'analyse parc par parc, les résultats présentés dans la section « Résultats » concernent les espèces d'envergure ≥ 100 cm, tandis

que les analyses pour les espèces ≥ 50 cm et pour toutes les espèces sont présentées en Annexes 7 et 8. Les analyses BACI et BA ont aussi été conduit sur des jeux de données avec des espèces d'envergures supérieures à 120cm et à 140cm, dont les résultats sont présentés en Annexes 12 et 13.

Résultats

Récolte des données et création de la base de données

En France, nos recherches ont permis de déterminer que 123 parcs éoliens (au sens entités juridiques) étaient équipés de SDA. D'un point de vue écologique, certaines entités juridiques peuvent cependant être regroupées du fait de leur proximité géographique ce qui équivaut finalement à 101 parcs équipés. Parmi ces parcs, seulement 26 disposent des rapports de suivis de mortalités exploitables pour pouvoir comparer les mortalités avant et après mise en place du SDA et 20 ont pu être associés à un témoin. Les parcs qui n'ont pas pu être jumelés à un témoin correspondent principalement à ceux équipés récemment d'un SDA, pour lesquels aucun parc sans SDA ne dispose de données couvrant à la fois les périodes « avant » et « après ». Les parcs témoins sont situés en moyenne à 66 km d'un parc équipé de SDA (min = 1 km ; max = 280 km). Les parcs recensés disposent de quatre marques distinctes de SDA : DT Bird, Safewind, Probird et Bioseco. Les trois premiers reposent sur la même technologie pour détecter la présence des oiseaux, à savoir des caméras 2D, tandis que Bioseco utilise des caméras 3D. Bien qu'exploitable, le parc de Montloubry 2, situé en région Auvergne-Rhône-Alpes, a été écarté des analyses *BACI* et *BA* car il était le seul équipé d'un SDA 3D (de la marque Bioseco), ce qui ne permettait pas d'élargir nos conclusions à ce type de technologie. En revanche, il a été conservé dans l'analyse parc par parc, menée sur l'ensemble des 26 parcs équipés.

Tableau 1 : Recensement du nombre de parcs (entité juridique) équipés de SDA par région française en septembre 2025 (Ballester, 2025). Le nombre de parcs comptés en tant qu'entités écologiques est indiqué entre parenthèses uniquement lorsqu'il diffère du décompte en entités juridiques. L'objectif de l'étude étant de comparer les mortalités avant et après la mise en place des SDA, seuls les parcs disposant d'au moins un rapport de suivi de mortalité avant et un après peuvent être inclus dans les analyses. Les parcs avec données manquantes sont ceux pour lesquels certaines informations (date de mise en place du SDA ou données brutes) sont absentes et ne permettent pas leur intégration aux analyses. La colonne « parcs avec données exploitables » correspond aux parcs disposant de rapports complets avant et après, pouvant être inclus dans les analyses.

Régions	Parcs équipés de SDA	Parcs sans suivi « après »	Parcs sans suivi « avant »	Parcs avec données manquantes	Parcs avec données exploitables
AuRA	9 (8)	5 (4)	0	2	2
BFC	17 (15)	8 (6)	4	3	2
Bretagne	1	0	0	0	1
Grand-Est	21 (19)	7	11 (10)	3 (2)	0
Haut-de-France	2	0	0	1	1
Normandie	2	0	1	1	0
Nouvelle-Aquitaine	5	0	5	0	0
Occitanie	62 (45)	8 (7)	15 (13)	6	33 (19)
PACA	1	0	1	0	0
Pays de la Loire	3	1	0	1	1
TOTAUX	123 (101)	29 (25)	37 (34)	17 (16)	40 (26)

Analyses statistiques

L'analyse BACI sur les espèces de plus de 50 cm d'envergure n'a montré aucune différence significative de la mortalité par jour par éolienne avant et après l'installation d'un SDA, quelque soit le type de parc (équipé ou témoin) (figure 1). Les parcs équipés présentent une diminution moyenne relative -25,49 % [-69,44 % ; 80,76 %] par rapport aux témoins. Cette variation n'est cependant pas significative (tableau 2).

Pour les espèces de plus de 100 cm d'envergure, la mortalité quotidienne par éolienne augmente, sur les parcs équipés comme sur les parcs témoins après l'installation du SDA (figure 2). La comparaison avec les parcs témoins montre également une baisse moyenne de -24,40 % [-65,59 % ; 75,85 %], là encore non significative, sur les parcs équipés (tableau 3).

Pour l'ensemble des espèces, une tendance à l'augmentation de la mortalité après mise en place du SDA est observée sur tous les parcs (équipés et témoins), non significative. Les parcs équipés relativement aux témoins présentent une diminution de -33,70 % [-70,85 % ; 48,63 %]. Cependant, là encore cette variation n'est pas significative (figure 3, tableau 4).

Sur les figures 4 et 5, les résultats des modèles en simple approche BA ne montrent pas de différence significative de la mortalité entre période et cela quelles que soient les classes de taille des espèces considérées, et la méthode statistique utilisée (médiane ou *bootstrap* paramétrique en Annexes 4 et 5). La différence de mortalités après installation des SDA est estimée à 23,64 % [-14,67 % ; 81,74 %] pour toutes les espèces, de -1,91 % [-42,30 % ; 70,48 %] pour les espèces d'envergure supérieur à 50 cm et de 9,28 % [-33,59 % ; 85,11 %] pour les espèces d'envergure supérieur à 100 cm (tableau 5).

Dans nos analyses parc par parc, nous avons utilisé 18 parcs équipés de Safewind, quatre parcs équipés de Probird, deux parcs équipés de DT Bird et un parc équipé de Bioseco (figure 6). Le modèle de SDA était manquant pour un parc. Aucun parc n'a montré de différence significative dans la mortalité par jour et par éolienne entre les périodes avant et après, selon le test bilatéral (p -values > 0,05, figure 6). Les médianes de mortalité restent variables, avec parfois une baisse et parfois une augmentation, sans tendance liée à un modèle particulier de SDA.

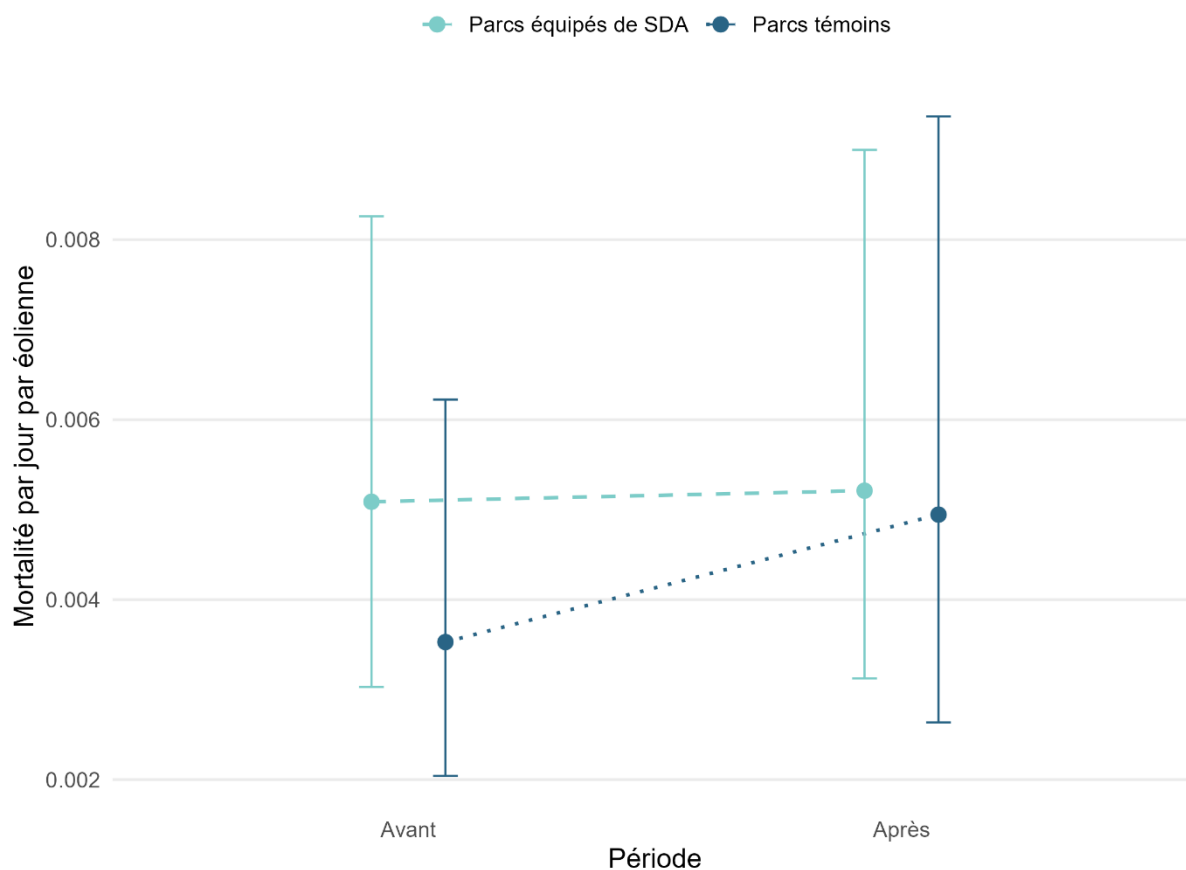


Figure 1 : Résultat des estimations renvoyées par le GLMM sur les médianes des distributions brutes des mortalités estimées pondérées par l'erreur standard pour les 20 parcs et leurs témoins sur des espèces de plus de 50 cm d'envergure.

Tableau 2 : Changements relatifs de mortalité avant/après SDA et par rapport au témoin sur les médianes des distributions brutes des mortalités estimées pondérées par l'erreur standard pour les 20 parcs et leurs témoins sur des espèces de plus de 50 cm d'envergure.

	0.5	0.025	0.975
SDA	4,13 %	-39,71 %	82,94 %
TEMOIN	38,47 %	-31,65 %	178,91 %
DIFF_RELATIVE	-25,49 %	-69,44 %	80,76 %

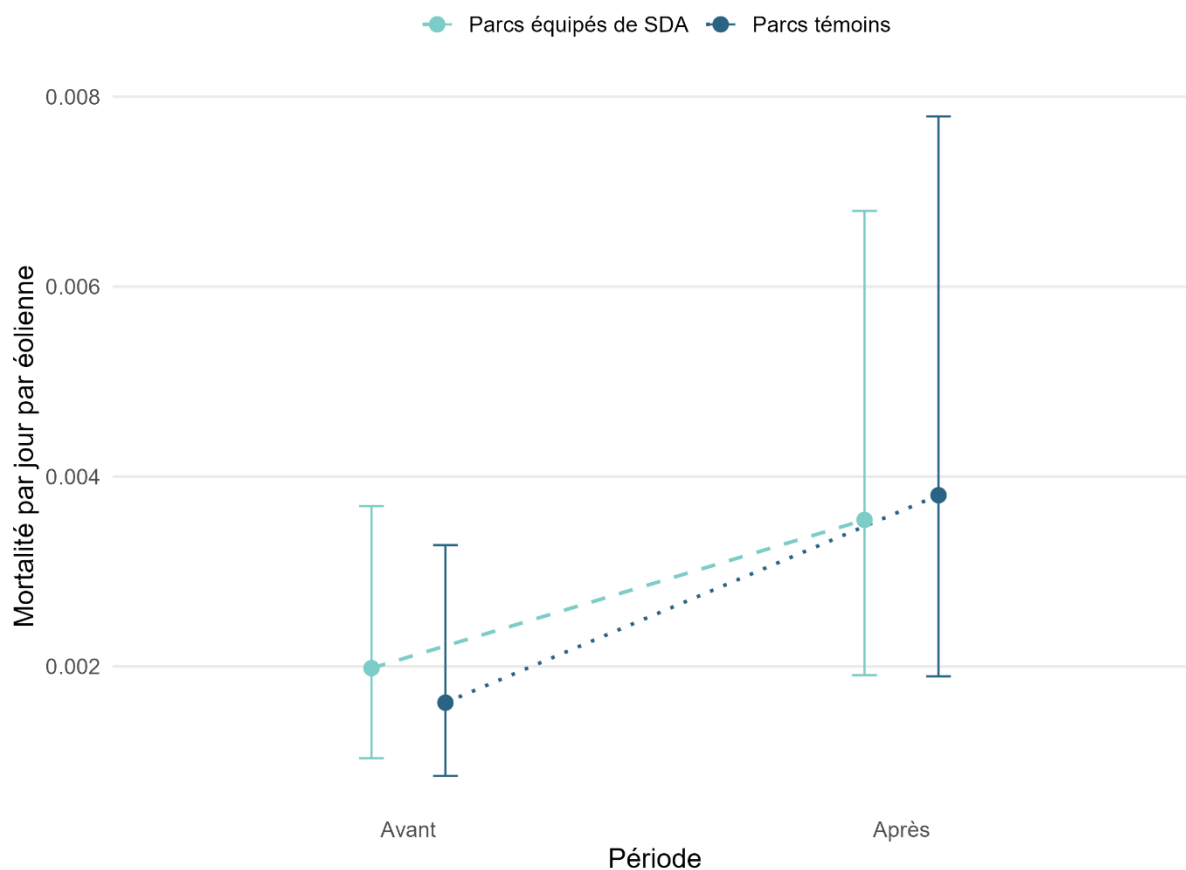


Figure 2 : Résultat des estimations renvoyées par le GLMM sur les médianes des distributions brutes des mortalités estimées pondérées par l'erreur standard pour les 20 parcs et leurs témoins sur des espèces de plus de 100 cm d'envergure.

Tableau 3 : Changements relatifs de mortalité avant/après SDA et par rapport au témoin sur les médianes des distributions brutes des mortalités estimées pondérées par l'erreur standard pour les 20 parcs et leurs témoins sur des espèces de plus de 100 cm d'envergure.

	0.5	0.025	0.975
SDA	80,48 %	0,93 %	214,88 %
TEMOIN	134,05 %	21,13 %	351,24 %
DIFF_RELATIVE	-24,40 %	-65,59 %	75,85 %

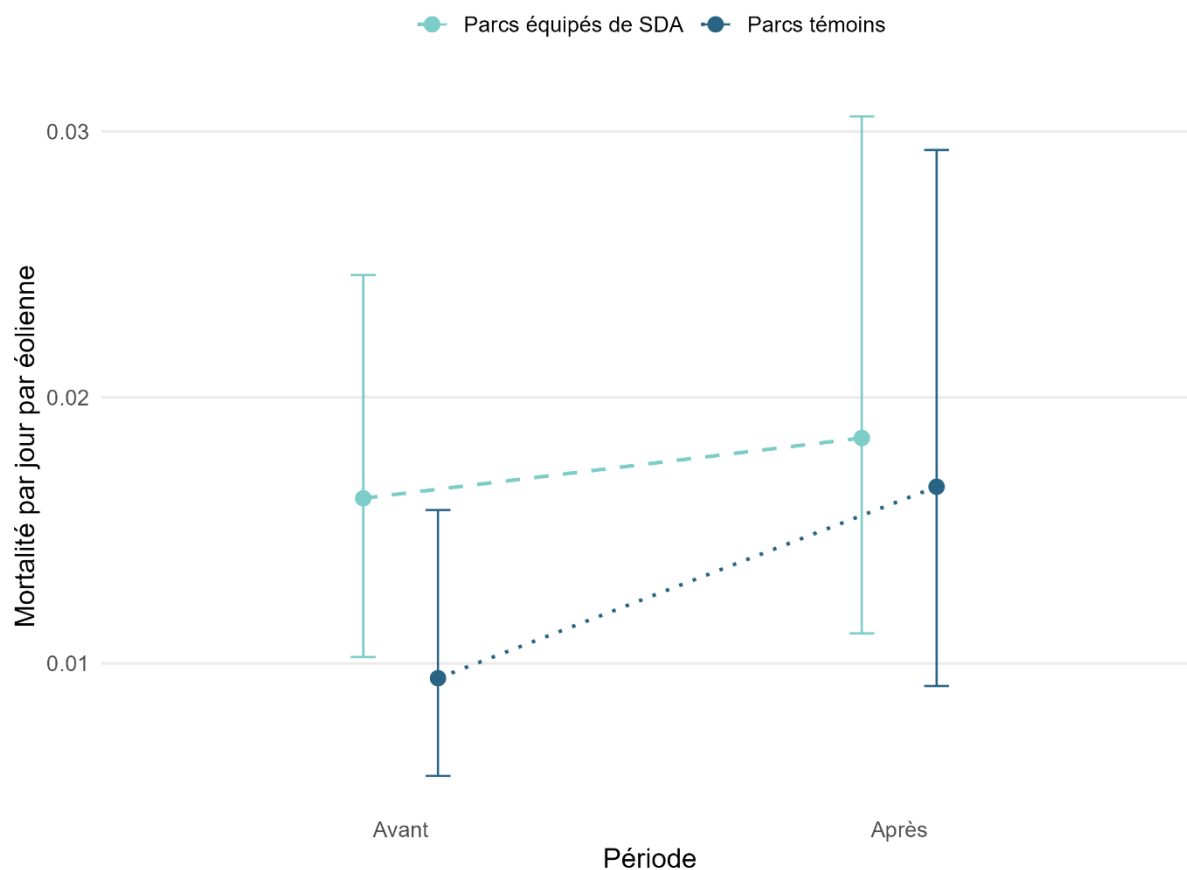


Figure 3 : Résultat des estimations renvoyées par le GLMM sur les médianes des distributions brutes des mortalités estimées pondérées par l'erreur standard pour les 20 parcs et leurs témoins sur toutes les espèces.

Tableau 4 : Changements relatifs de mortalité avant/après SDA et par rapport au témoin sur les médianes des distributions brutes des mortalités estimées pondérées par l'erreur standard pour les 20 parcs et leurs témoins sur toutes les espèces.

	0.50	0.025	0.975
SDA	15,30 %	-31,45 %	87,58 %
TEMOIN	74,27 %	-8,30 %	224,39 %
DIFF_RELATIVE	-33,70 %	-70,85 %	48,63 %

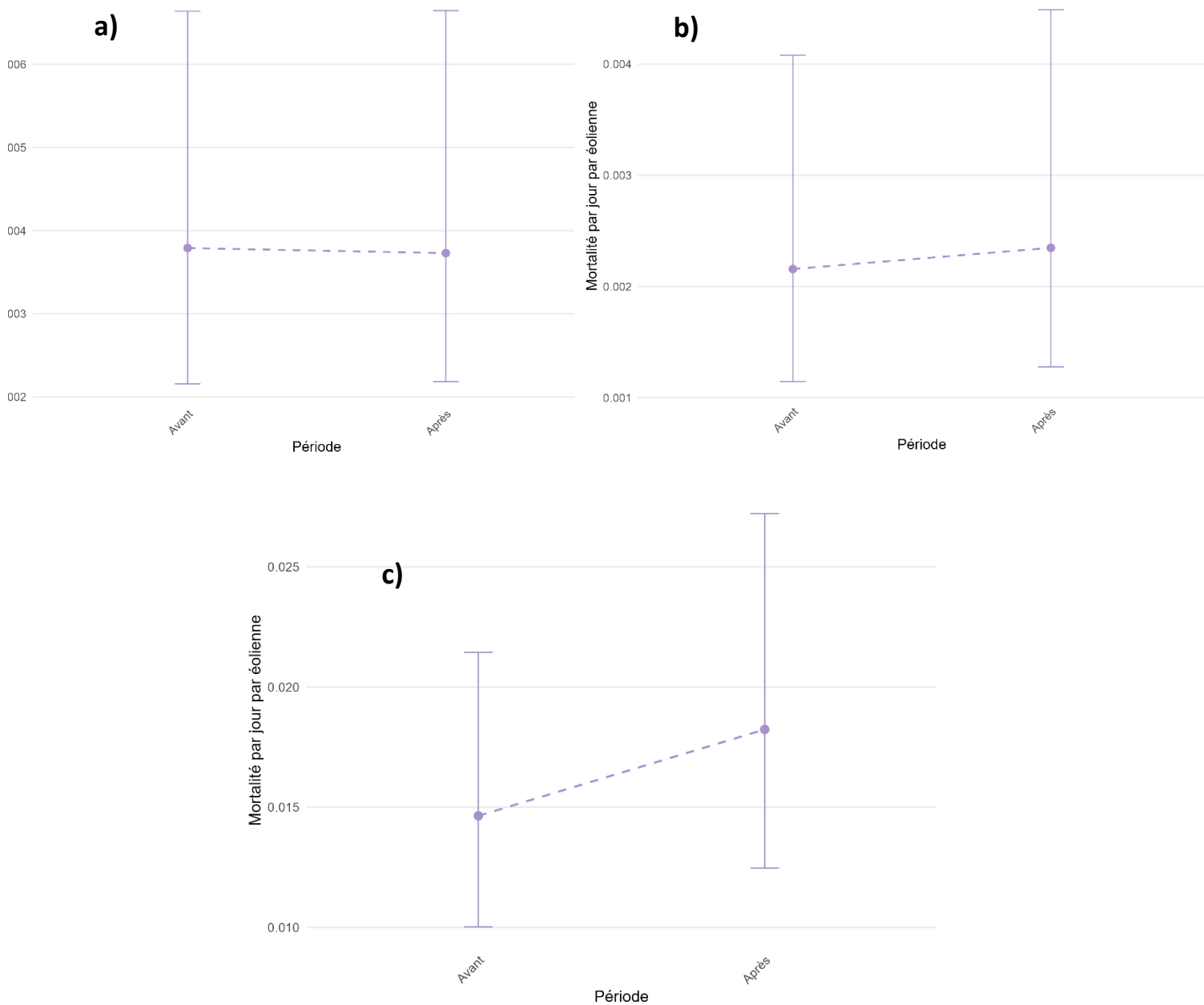


Figure 4 : Résultat des estimations renvoyées par le GLMM sur les médianes des distributions brutes des mortalités estimées pondérées par l'erreur standard pour les 25 parcs équipés de SDA. Les jeux de données concernent : **a)** les espèces d'envergure supérieur à 50cm, **b)** les espèces d'envergure supérieur à 100cm et **c)** toutes les espèces.

Tableau 5 : Changements relatifs de mortalité avant/après SDA sur les médianes des distributions brutes des mortalités estimées pondérées par l'erreur standard pour les 25 parcs selon l'envergure des espèces.

	0.50	0.025	0.975
TOUTES ESPECES	23,64 %	-14,67 %	81,74 %
SUP A 50 CM	-1,91 %	-42,30 %	70,48 %
SUP A 100 CM	9,28 %	-33,59 %	85,11 %

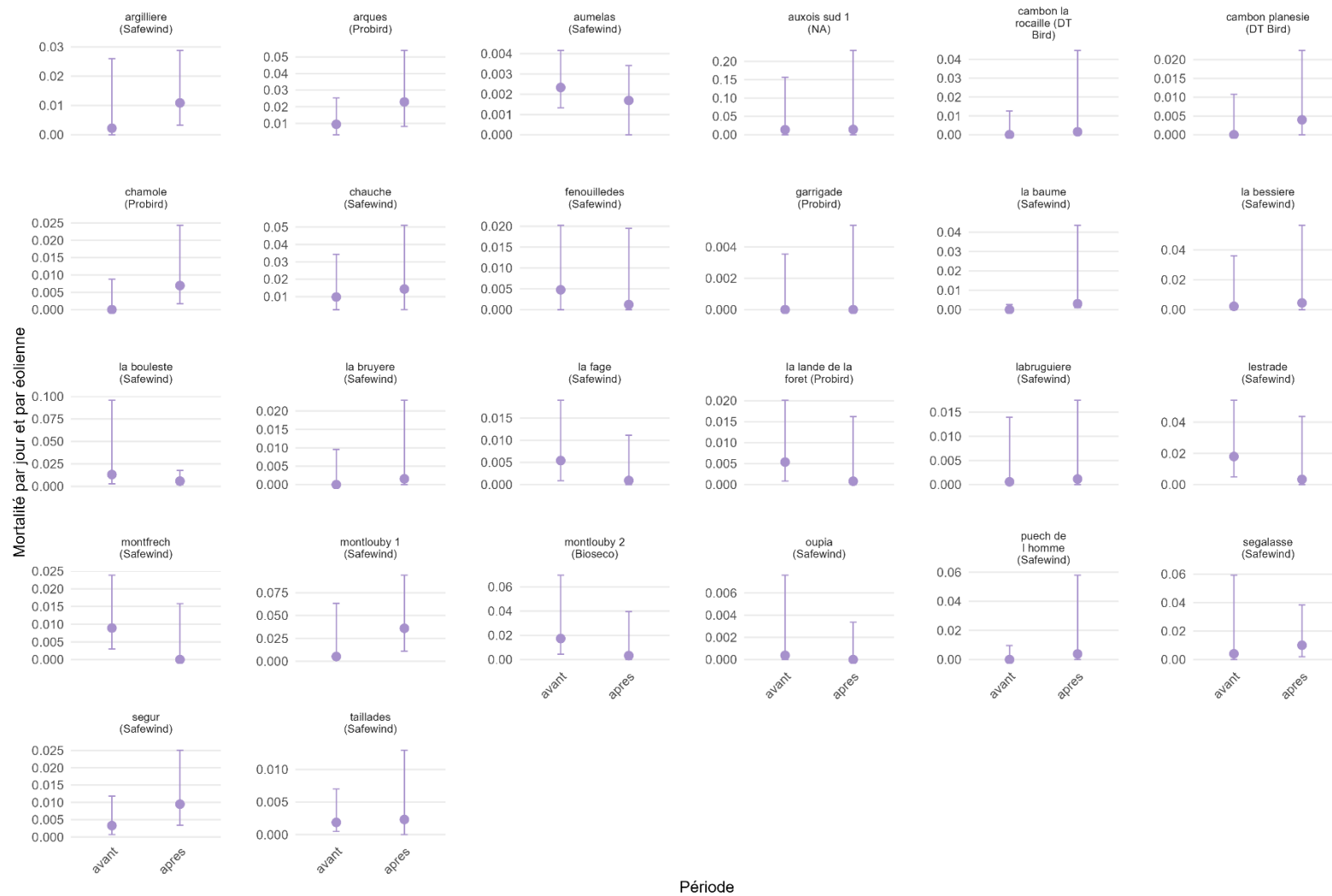


Figure 6 : Résultat des estimations renvoyées par le GLMM sur les médianes des distributions tronquées des mortalités estimées pondérées par l'erreur standard pour chacun des 26 parcs sur des espèces de plus de 100 cm d'envergure.

Discussion

A ce jour, nous avons pu recenser un total de 123 parcs équipés de SDA en France : Occitanie (62), Hauts-de-France (2), Pays-de-la-Loire (3), Normandie (2), AuRA (9), Bourgogne-Franche-Comté (17), Grand-Est (21), Nouvelle-Aquitaine (5), PACA (1), Bretagne (1), Centre-Val de Loire (0), Ile-de-France (0), Corse (0) (Annexe 9). Ces 123 entités juridiques correspondent à 101 entités écologiques.

Parmi ces 101 entités écologiques, il y a 34 parcs équipés de SDA qui n'ont pas de suivis de mortalités réalisés avant la mise en place du SDA ce qui ne permettra jamais de vérifier l'efficacité des dispositifs avec ces sites (tableau 1). La systématisation de l'installation des SDA dès la mise en service des parcs limite ainsi la possibilité de disposer de données comparatives avant/après, et soulève la question du choix entre la réduction immédiate des mortalités et la nécessité de démontrer l'efficacité des mesures mises en place. Par ailleurs, 25 parcs équipés de SDA supplémentaires n'ont pas de suivi réalisé après leur installation, probablement parce qu'ils ont été équipés récemment (tableau 1). Avec la généralisation progressive de ces dispositifs, de nouvelles données devraient toutefois devenir disponibles dans les prochaines années, soulignant l'importance de poursuivre et renforcer les efforts de collecte et de suivi des données sur ces parcs.

Pour les analyses, nous avons utilisé 118 rapports de mortalité dont 18 rapports incluant des données antérieures à 2018 inclus, année de mise à jour des protocoles de suivis (Annexe 10). Ainsi, dans les données utilisées pour les analyses, parfois les tests de persistance ne sont pas réalisés jusqu'à J +14 ou ne sont parfois pas du tout réalisés. L'historique précis du suivi est parfois manquant avec juste une précision de la date de début et de fin du suivi ainsi qu'une fréquence de fréquentation par semaine. Ce manque d'information nous a parfois obligé à approximer la persistance, l'efficacité de l'observateur ou l'effort d'échantillonnage. L'approximation de ces paramètres de persistance, d'efficacité ou des dates de suivi de mortalité peut augmenter l'incertitude dans l'estimation des mortalités réelles.

Les analyses BACI réalisées sur 20 parcs équipés de SDA et leurs parcs témoins puis les analyses BA réalisées sur 25 parcs équipés de SDA n'ont mis en évidence aucune réduction significative des mortalités après l'installation des SDA. De même que les analyses complémentaires réalisées sur uniquement les parcs utilisant de manière certaine le bridage actif (n = 19 pour BACI et n = 22 pour BA) sur les trois catégories d'envergure ainsi que sur les envergures supérieures à 120 cm et à 140 cm (Annexe 12 et 13). En moyenne, on observe toutefois une légère tendance à la baisse, de l'ordre de 20-35 %, dans les parcs équipés par rapport aux témoins et ce pour l'ensemble des groupes d'envergure (toutes espèces, d'envergure >50 cm et d'envergure >100 cm), bien que cette différence ne soit jamais significative. Les parcs témoins, de leur côté, présentent une tendance moyenne à l'augmentation des mortalités. Ces observations suggèrent que les variations mesurées sont

aléatoires. L'analyse BA sans témoins confirme ce caractère aléatoire, montrant même une légère augmentation des mortalités après mise en place des SDA pour les classes « toutes les espèces » et « espèces d'envergure >100 cm ». Ces résultats sont cohérents avec ceux de l'étude de Huso et Dalthorp (2022), qui ont réanalysé les données d'un parc équipé d'Identiflight sans observer de différence significative entre les mortalités avant et après la mise en service du SDA. A noter que nos analyses concernent des caméras 2D, tandis qu'Identiflight est une caméra 3D probablement plus efficace que du 2D. L'efficacité des technologies 2D, 3D et radar n'a pas pu être comparée dans notre étude, notre jeu de données ne comprenant qu'un seul parc équipé d'une caméra 3D que nous avons dû retirer par souci d'homogénéité des analyses et aucun avec radar. Il serait intéressant de mener l'analyse sur plusieurs parcs équipés de caméras 3D ou radar, qui semblent présenter de meilleures performances en termes de détection, afin d'évaluer leur capacité réelle à réduire les mortalités (Duerr et al., 2023).

L'analyse complémentaire menée parc par parc montre que les mortalités restent globalement stables avant et après la mise en place des SDA, sans variations marquées. Les changements observés sont faibles et ne présentent pas de corrélation avec les modèles de SDA utilisés. D'après les informations disponibles, il apparaît que, pour deux parcs, des ajustements de paramétrage ou des mesures correctives ont été mis en œuvre au cours de la période après la mise en place du SDA (Annexe 11). Pour l'un de ces deux parcs (La Baume), le site aurait en plus été mis à l'arrêt pendant la période avant afin de tester un dispositif d'effarouchement. Par ailleurs, pour trois parcs (La Bessière, Puech de l'homme, La Bouleste), les dates de mise en fonctionnement du SDA diffèrent entre les données fournies par les DREAL et celles mentionnées dans les rapports de suivi de mortalité. Dans ces cas, nous nous sommes fiés aux rapports des DREAL, bien que ces informations puissent comporter une marge d'erreur. De plus, selon différents acteurs, ces changements ne sont pas toujours documentés par écrit. L'absence d'effet, voire l'augmentation des mortalités après mise en place des SDA n'est donc probablement pas explicable par des changements de pratiques de bridage autre que la mise en place des SDA.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer pourquoi nos analyses n'ont pas mis en évidence d'effet clair des SDA sur les mortalités dans les parcs éoliens. Tout d'abord, les réglages opérationnels de ces dispositifs peuvent influencer leur efficacité : la sensibilité (taille minimale détectable), la couverture spatiale (les angles de surveillance) ou le paramétrage de la zone à risque peuvent ne pas être optimaux pour détecter et réagir efficacement aux oiseaux (Corbeau and Besnard, 2021; Dupont et al., 2023). Les performances des systèmes c'est-à-dire leur couverture temporelle, leur capacité de détection et d'identification, ainsi que leur capacité de réaction peuvent également influencer sur leur efficacité (Ballester et al., 2024). Ensuite, les différences technologiques entre les dispositifs (caméras 2D, 3D, radar) peuvent jouer un rôle : les caméras 2D, très majoritaires dans notre jeu de données, pourraient présenter des limites dans la détection et l'identification des oiseaux par rapport aux caméras 3D ou aux radars (Duerr et al., 2023). Le temps de réaction des éoliennes aux

signaux des SDA constitue également un paramètre crucial : même lorsqu'un oiseau est détecté, un délai dans la prise en compte de l'ordre de ralentissement ou un temps de décélération des pales trop long, peut réduire, voire annuler, la capacité du dispositif à diminuer les mortalités (Fluhr et al., 2025). Enfin, le comportement et la perception des oiseaux peuvent entraîner des collisions avec une éolienne à l'arrêt ou avec des pales en rotation ralentie, rendant inefficace l'utilisation des SDA (Blary et al., 2023). L'ensemble de ces éléments suggère que leur efficacité, tout du moins pour les systèmes 2D, est limitée dans les conditions réelles observées, malgré la variabilité des dispositifs et des contextes.

Il convient de souligner que la disponibilité des parcs témoins constitue une limite dans cette étude : il est en effet difficile d'identifier des sites géographiquement proches et présentant des écosystèmes réellement comparables. Toutefois, cette limite ne semble pas modifier les tendances générales mises en évidence, qui montrent que les mortalités restent globalement stables, voire augmentent, après la mise en place des SDA. De même, bien qu'un élargissement du nombre de parcs étudiés serait souhaitable, le signal observé étant particulièrement faible, il faudrait disposer d'un nombre très important de parcs supplémentaires pour espérer révéler des différences statistiquement significatives.

Cette étude conduit aussi à formuler plusieurs recommandations pour améliorer la qualité des données et renforcer l'évaluation de l'efficacité des SDA dans les parcs éoliens. Une attention particulière doit être portée au respect du protocole mis à jour en 2018 et notamment dans la mention des données brutes dans les rapports du suivi de mortalité. Le respect systématique de ces normes réduirait les incertitudes liées aux approximations actuelles de l'analyse (Huso, 2014). Une standardisation de la présentation des futures données brutes pourrait par exemple être envisagée en remplissant des fichiers Excel formatés de manière homogène pour faciliter leur intégration dans une base de données nationale permettant des analyses statistiques sur la mortalité aviaire sur les parcs. Enfin, une augmentation de la fréquence des passages sur les sites pourrait contribuer à réduire les intervalles de confiance des estimations et ainsi gagner en puissance statistique. Cependant les médianes des différentes catégories du BACI étant relativement proches et les intervalles de confiance des effets très larges, il n'est pas garanti qu'un tel effort suffirait à détecter des différences aussi faibles.

Parallèlement, il apparaît essentiel de faciliter l'accès aux informations concernant les parcs équipés de SDA, notamment les dates d'installation et les modèles de systèmes utilisés. Actuellement, seules les DREAL participent activement à la collecte de ces données, tandis que les fournisseurs de SDA, les bureaux d'études, les syndicats éoliens et les opérateurs renvoient à des conditions de confidentialité qui limitent le partage d'informations. Cette phase de collecte s'est révélée chronophage et reste incomplète. Dans ce contexte, nous avons publié notre travail de recensement des parcs équipés de SDA, reposant sur des informations publiques, qui constitue ainsi une base de données directement liée au jeu de

données utilisé dans ce rapport (Ballester, 2025). A ce stade, il semble crucial d'obtenir une meilleure coordination entre les acteurs ainsi que le partage et l'alimentation d'une base de données nationale pour faciliter de tels travaux sur l'efficacité des SDA. En ce sens, la plateforme DEPOBIO, dont les données devraient prochainement être mises à disposition, pourrait grandement améliorer l'accès, la centralisation et l'homogénéisation des informations nécessaires à l'évaluation de ces systèmes.

Communications

A son lancement, le projet a été présenté au webinaire SolEoBio le 5 avril 2024.

Les résultats du projet ont été présentés au Colloque Francophone d'Ornithologie (CFO), en décembre 2025 puis au webinaire SolEoBio le 9 janvier 2025.

Financements

Ce projet a été financé par les Fonds Verts – Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse.

Bibliographie

- Arnett, E.B., Baerwald, E.F., Mathews, F., Rodrigues, L., Rodríguez-Durán, A., Rydell, J., Villegas-Patraca, R., Voigt, C.C., 2016. Impacts of Wind Energy Development on Bats: A Global Perspective, in: Voigt, C.C., Kingston, T. (Eds.), *Bats in the Anthropocene: Conservation of Bats in a Changing World*. Springer International Publishing, Cham, pp. 295–323. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25220-9_11
- Aschwanden, J., Wanner, S., Liechti, F., 2014. Investigation on the effectivity of bat and bird detection at a wind turbine: Final Report Bird Detection 35.
- Ballester, C., 2025. Parcs éoliens terrestres équipés de SDA (Systèmes de Détection Automatique) en France. <https://doi.org/10.48579/PRO/XQIKBR>
- Ballester, C., Dupont, S.M., Corbeau, A., Chambert, T., Duriez, O., Besnard, A., 2024. A standardized protocol for assessing the performance of automatic detection systems used in onshore wind power plants to reduce avian mortality. *Journal of Environmental Management* 354, 120437. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120437>
- Beston, J.A., Diffendorfer, J.E., Loss, S.R., Johnson, D.H., 2016. Prioritizing Avian Species for Their Risk of Population-Level Consequences from Wind Energy Development. *PLoS ONE* 11, e0150813. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150813>
- Blary, C., Bonadonna, F., Dussauze, E., Potier, S., Besnard, A., Duriez, O., 2023. Detection of wind turbines rotary motion by birds: A matter of speed and contrast. *Conservat Sci and Prac* 5, e13022. <https://doi.org/10.1111/csp2.13022>
- Bolker, B.M., Brooks, M.E., Clark, C.J., Geange, S.W., Poulsen, J.R., Stevens, M.H.H., White, J.-S.S., 2009. Generalized linear mixed models: a practical guide for ecology and evolution. *Trends in Ecology & Evolution* 24, 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.10.008>
- Carrete, M., Sánchez-Zapata, J.A., Benítez, J.R., Lobón, M., Donázar, J.A., 2009. Large scale risk-assessment of wind-farms on population viability of a globally endangered long-lived raptor. *Biological Conservation* 142, 2954–2961. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.07.027>
- Chum, H., Faaij, A., Moreira, J., Berndes, G., Dhamija, P., Dong, H., Gabrielle, B., Eng, A.G., Lucht, W., Mapako, M., Cerutti, O.M., McIntyre, T., Minowa, T., Pingoud, K., Bain, R., Chiang, R., Dawe, D., Heath, G., Junginger, M., Patel, M., Yang, J., Warner, E., Paré, D., Ribeiro, S.K., 2011. Bioenergy, in: Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlömer, S., Von Stechow, C., Matschoss, P. (Eds.), *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge University Press, pp. 209–332. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139151153.006>
- Corbeau, A., Besnard, A., 2021. Les systèmes de détection-réaction dans les parcs éoliens, un moyen de réduction des mortalités aviaires : Principes et conseils pour une bonne évaluation.
- Dalthorp, D., 2023. eoa3: Wildlife Mortality Estimator for Low Fatality Rates and Imperfect Detection.
- Dalthorp, D., Huso, M., Dail, D., 2017. Evidence of Absence (v2.0) Software User Guide: U.S. Geological Survey Data Series 1055 (Data Series).
- 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 (Techniques and Methods), Techniques and Methods.

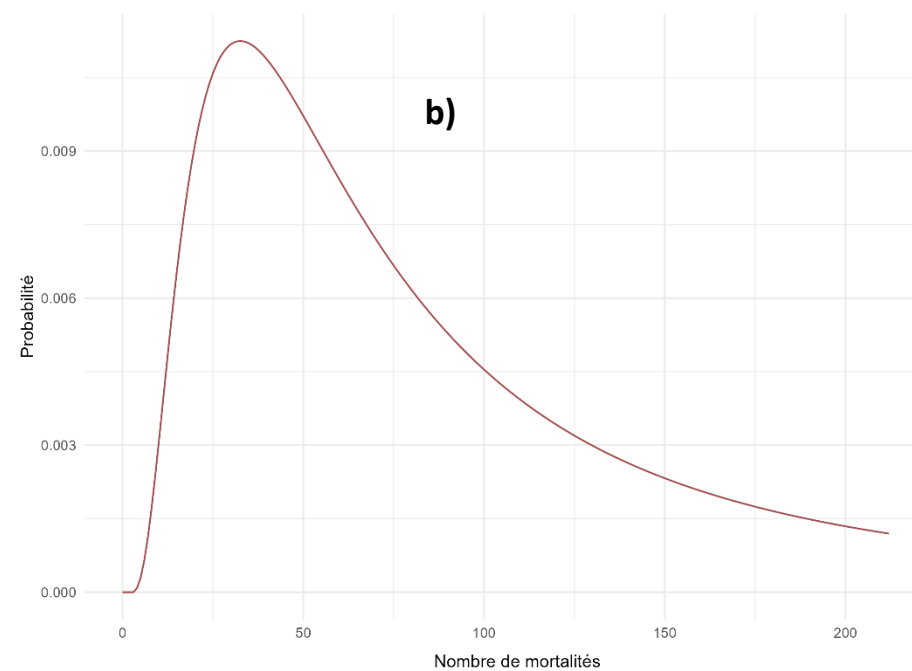
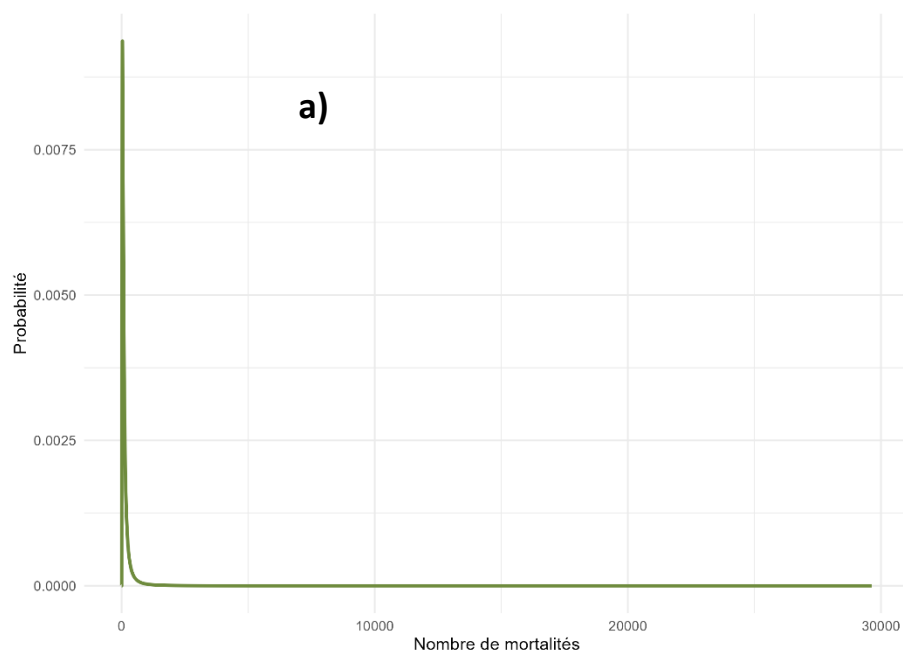
- Dalthorp, D., Simonis, J., Madsen, L., Huso, M., Rabie, P., Mintz, J., Wolpert, R., Studyvin, J., Korner-Nievergelt, F., 2023. GenEst: Generalized Mortality Estimator.
- Drewitt, A.L., Langston, R.H.W., 2006. Assessing the impacts of wind farms on birds: Impacts of wind farms on birds. *Ibis* 148, 29–42. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2006.00516.x>
- Duerr, A.E., Parsons, A.E., Nagy, L.R., Kuehn, M.J., Bloom, P.H., 2023. Effectiveness of an artificial intelligence-based system to curtail wind turbines to reduce eagle collisions. *PLoS ONE* 18, e0278754. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278754>
- Dupont, S.M., Corbeau Alexandre, Ballester Cyrielle, Duriez Olivier, Besnard Aurélien, 2023. Protocole d'évaluation des performances des systèmes de détection-réaction ; Protocoles « parc » et « fournisseur ». <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14315.72481>
- Durá-Alemañ, C.J., Moleón, M., Pérez-García, J.M., Serrano, D., Sánchez-Zapata, J.A., 2023. Climate change and energy crisis drive an unprecedented EU environmental law regression. *Conservation Letters*. e12958. <https://doi.org/10.1111/conl.12958>
- Duriez, O., Pilard, P., Saulnier, N., Boudarel, P., Besnard, A., 2023. Windfarm collisions in medium-sized raptors: even increasing populations can suffer strong demographic impacts. *Animal Conservation* 26, 264–275. <https://doi.org/10.1111/acv.12818>
- Efron, B., Tibshirani, R., 1985. The bootstrap method for assessing statistical accuracy.
- Ferrer, M., Alloing, A., Baumbush, R., Morandini, V., 2022. Significant decline of Griffon Vulture collision mortality in wind farms during 13-year of a selective turbine stopping protocol. *Global Ecology and Conservation* 38, e02203. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e02203>
- Ferrer, M., de Lucas, M., Janss, G.F.E., Casado, E., Muñoz, A.R., Bechard, M.J., Calabuig, C.P., 2012. Weak relationship between risk assessment studies and recorded mortality in wind farms: *EIA does not predict mortality in wind farms*. *Journal of Applied Ecology* 49, 38–46. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02054.x>
- Fluhr, J., Duriez, O., Blary, C., Chambert, T., Almasi, B., Byholm, P., Buitendijk, N.H., Champagnon, J., Dagys, M., Fiedler, W., Francesiaz, C., Jiguet, F., Lee, S., Millon, A., Monti, F., Morcelet, L., Nathan, R., Nolet, B.A., Nuijten, R., Pilard, P., Ponchon, C., Roulin, A., Santos, C.D., Spiegel, O., Schalcher, K., De Seynes, A., Spanoghe, G., Wikelski, M., Żydelis, R., Besnard, A., 2025. *Eoldist*, a Web Application for Estimating Cautionary Detection Distance of Birds by Automatic Detection Systems to Reduce Collisions With Wind Turbines. *Wind Energy* 28, e2971. <https://doi.org/10.1002/we.2971>
- France, 2015. Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte.
- Gómez-Catasús, J., Garza, V., Traba, J., 2018. Wind farms affect the occurrence, abundance and population trends of small passerine birds: The case of the Dupont's lark. *J Appl Ecol* 55, 2033–2042. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13107>
- Got, C., Wellenreiter, S., 2025. Chiffres clés des énergies renouvelables.
- Gradolewski, D., Dziak, D., Martynow, M., Kaniecki, D., Szurlej-Kielanska, A., Jaworski, A., Kulesza, W.J., 2021. Comprehensive Bird Preservation at Wind Farms. *Sensors* 21, 267. <https://doi.org/10.3390/s21010267>
- Hanagasioglu, M., Aschwanden, J., Bontadina, F., de la Puente Nilsson, M., 2015. Investigation of the effectiveness of bat and bird detection of the DTBat and DTBird systems at Calandawind turbine.
- Huso, M., Dalthorp, D., 2023. Reanalysis indicates little evidence of reduction in eagle mortality rate by automated curtailment of wind turbines. *Journal of Applied Ecology* 1365-2664.14196. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14196>

- Huso, M.M.P., Dalthorp, D., Dail, D., Madsen, L., 2015. Estimating wind-turbine-caused bird and bat fatality when zero carcasses are observed. *Ecological Applications* 25, 1213–1225. <https://doi.org/10.1890/14-0764.1>
- Katzner, T.E., Nelson, D.M., Diffendorfer, J.E., 2019. Wind energy: An ecological challenge. *Science* 366, 1207–1208. <https://doi.org/10.1126/science.aaz9244>
- Kuvlesky, W.P., Brennan, L.A., Morrison, M.L., Boydston, K.K., Ballard, B.M., Bryant, F.C., 2007. Wind Energy Development and Wildlife Conservation: Challenges and Opportunities. *Journal of Wildlife Management* 71, 2487–2498. <https://doi.org/10.2193/2007-248>
- Liechti, F., Guélat, J., Komenda-Zehnder, S., 2013. Modelling the spatial concentrations of bird migration to assess conflicts with wind turbines. *Biological Conservation* 162, 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.03.018>
- Loss, S.R., Will, T., Marra, P.P., 2013. Estimates of bird collision mortality at wind facilities in the contiguous United States. *Biological Conservation* 168, 201–209. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2013.10.007>
- Marques, A.T., Batalha, H., Rodrigues, S., Costa, H., Pereira, M.J.R., Fonseca, C., Mascarenhas, M., Bernardino, J., 2014. Understanding bird collisions at wind farms: An updated review on the causes and possible mitigation strategies. *Biological Conservation* 179, 40–52. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.08.017>
- May, R., Hamre, Ø., Vang, R., Nygård, T., 2012. Evaluation of the DTBird video-system at the Smøla wind-power plant. Detection capabilities for capturing near-turbine avian behaviour. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1909.9928>
- McClure, C., Rolek, B.W., Dunn, L., McCabe, J.D., Martinson, L., Katzner, T., 2021. Eagle fatalities are reduced by automated curtailment of wind turbines. *J Appl Ecol* 58, 446–452. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13831>
- McClure, C., Rolek, B.W., Dunn, L., McCabe, J.D., Martinson, L., Katzner, T.E., 2022. Confirmation that eagle fatalities can be reduced by automated curtailment of wind turbines. *Ecol Sol and Evidence* 3. <https://doi.org/10.1002/2688-8319.12173>
- McClure, C.J.W., Martinson, L., Allison, T.D., 2018. Automated monitoring for birds in flight: Proof of concept with eagles at a wind power facility. *Biological Conservation* 224, 26–33.
- R Core Team, 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing,.
- Réseau de Transport d'Électricité (RTE), 2025. Panorama de l'électricité renouvelable 2024.
- Sand, C.-A., Normand, B., Kerbirou, C., Barré, K., Ravache, A., 2024. Suivis réglementaires de la mortalité dans les parcs éoliens : de l'analyse locale à l'approche intégrée. SET 8312. <https://doi.org/10.20870/Revue-SET.2024.46.8312>
- Service de la donnée et des études statistiques (SDÉS), 2025. Tableau de bord : éolien Quatrième trimestre 2024 - n°710.
- Smallwood, K Shawn, Bell, D.A., 2020. Effects of Wind Turbine Curtailment on Bird and Bat Fatalities. *The Journal of Wildlife Management* 84, 685–696. <https://doi.org/10.1002/jwmg.21844>
- Smallwood, K. Shawn, Bell, D.A., 2020. Effects of Wind Turbine Curtailment on Bird and Bat Fatalities. *Jour. Wild. Mgmt.* 84, 685–696. <https://doi.org/10.1002/jwmg.21844>
- Teske, S. (Ed.), 2019. Achieving the Paris Climate Agreement Goals: Global and Regional 100% Renewable Energy Scenarios with Non-energy GHG Pathways for +1.5°C and +2°C. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-05843-2>
- Thaxter, C.B., Buchanan, G.M., Carr, J., Butchart, S.H.M., Newbold, T., Green, R.E., Tobias, J.A., Foden, W.B., O'Brien, S., Pearce-Higgins, J.W., 2017. Bird and bat species'

- global vulnerability to collision mortality at wind farms revealed through a trait-based assessment. *Proc. R. Soc. B.* 284, 20170829. <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.0829>
- Tinsley, E., Froidevaux, J.S.P., Zsebök, S., Szabadi, K.L., Jones, G., 2023. Renewable energies and biodiversity: Impact of ground-mounted solar photovoltaic sites on bat activity. *Journal of Applied Ecology* 60, 1752–1762. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14474>
- Watson, R.T., Kolar, P.S., Ferrer, M., Nygård, T., Johnston, N., Hunt, W.G., Smit-Robinson, H.A., Farmer, C.J., Huso, M., Katzner, T.E., 2018. Raptor Interactions With Wind Energy: Case Studies From Around the World. *Journal of Raptor Research* 52, 1–18. <https://doi.org/10.3356/JRR-16-100.1>
- World Resources Institute (WRI), 2024. Where Do Emissions Come From? 4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Sector.
- Zimmerling, J.R., Francis, C.M., 2016. Bat mortality due to wind turbines in Canada: Bats and Wind Turbines. *Jour. Wild. Mgmt.* 80, 1360–1369. <https://doi.org/10.1002/jwmg.21128>
- Zimmerling, J.R., Pomeroy, A.C., d'Entremont, M.V., Francis, C.M., 2013. Canadian Estimate of Bird Mortality Due to Collisions and Direct Habitat Loss Associated with Wind Turbine Developments. *ACE* 8, art10. <https://doi.org/10.5751/ACE-00609-080210>

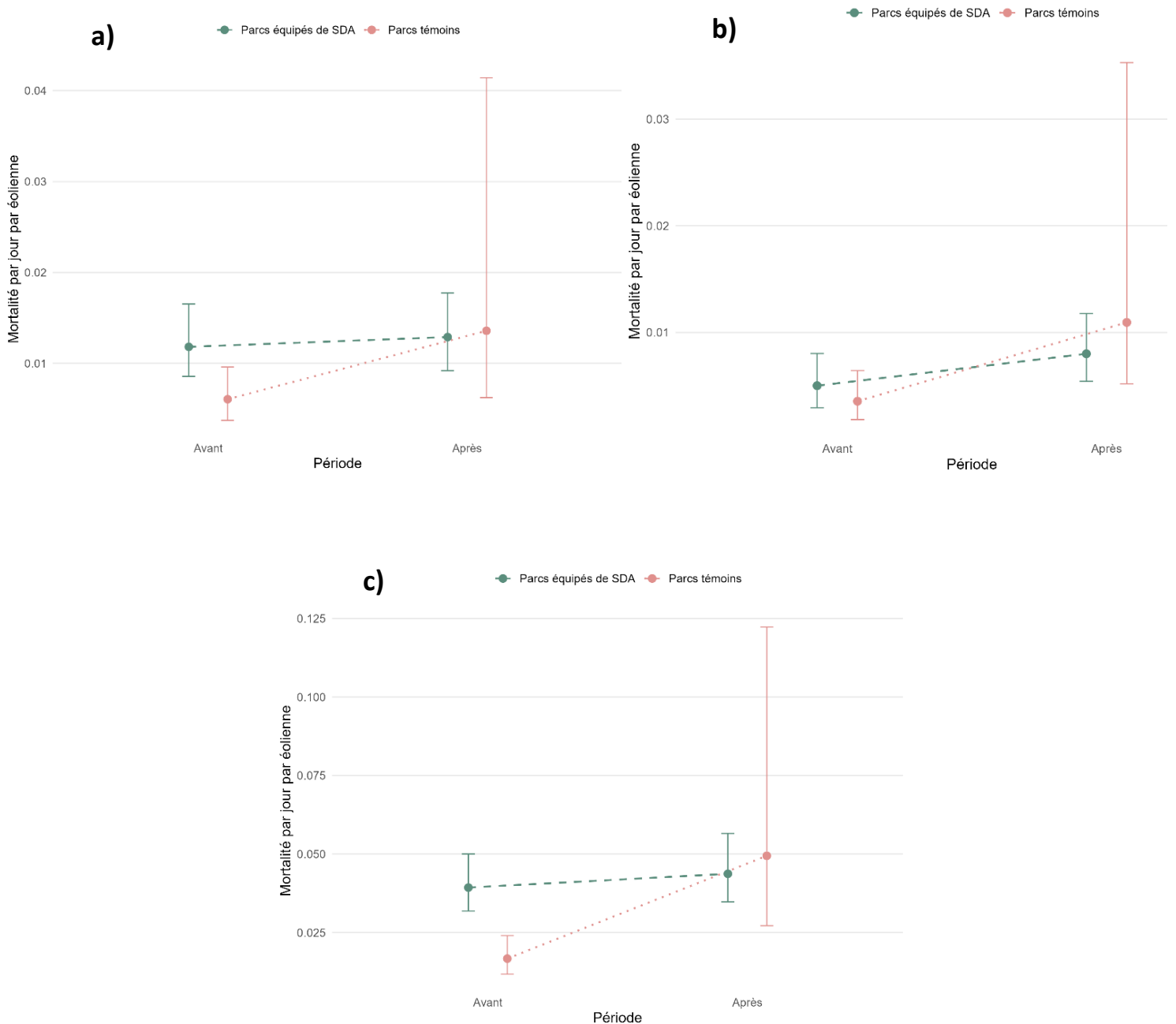
Annexes

Annexe 1 : Exemple d'une distribution des mortalités estimées a) brute et b) tronquée avec un seuil de 0.001 puis renormalisée.



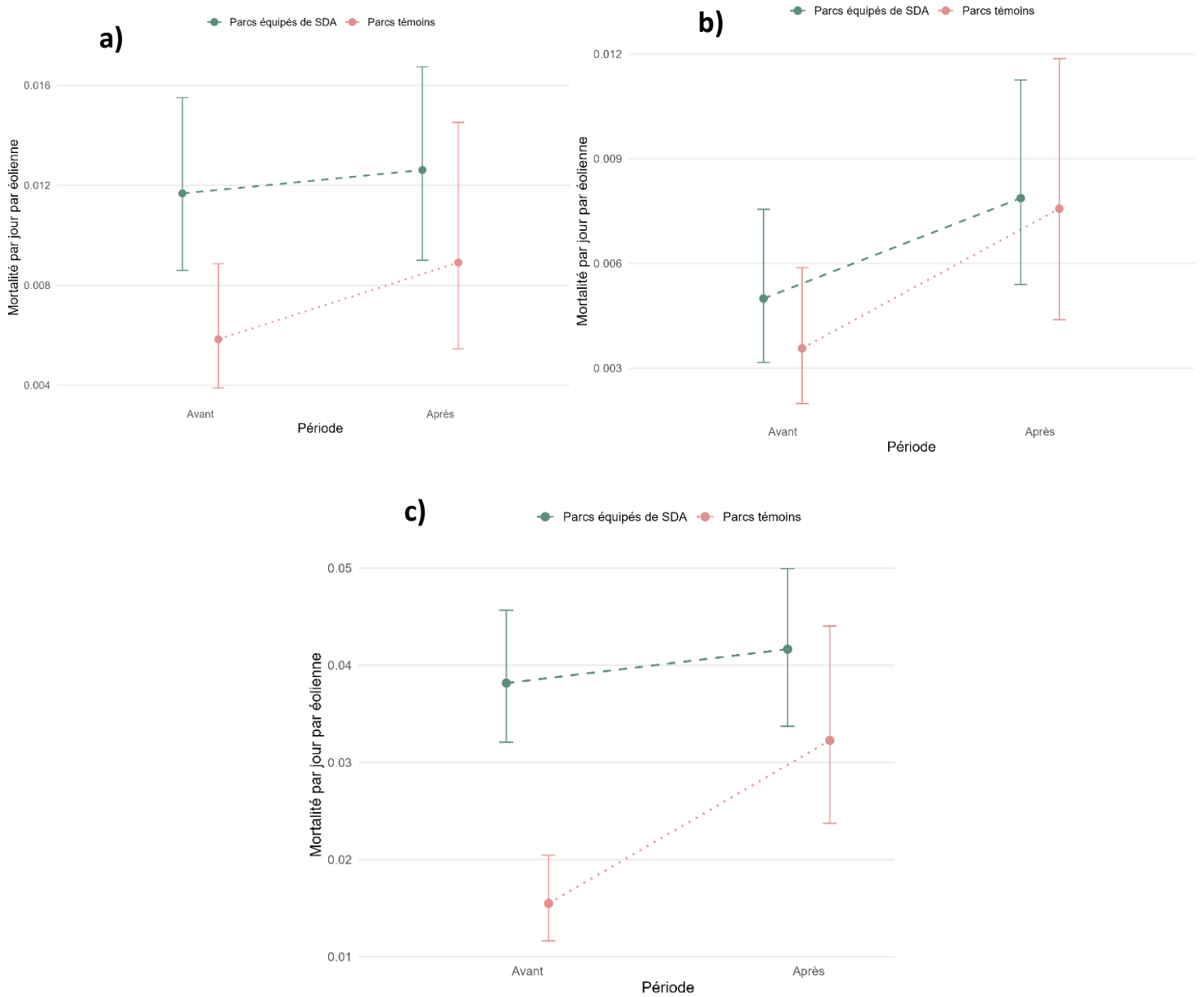
Annexe 2 : Résultat des estimations renvoyées par les GLMM sur 1000 tirages de mortalités dans la distribution brute des mortalités estimées (*bootstrap*) pour les 20 parcs et leurs témoins.

Les jeux de données concernent : **a)** des espèces de plus de 50 cm d'envergure, **b)** des espèces de plus de 100 cm d'envergure et **c)** toutes les espèces.



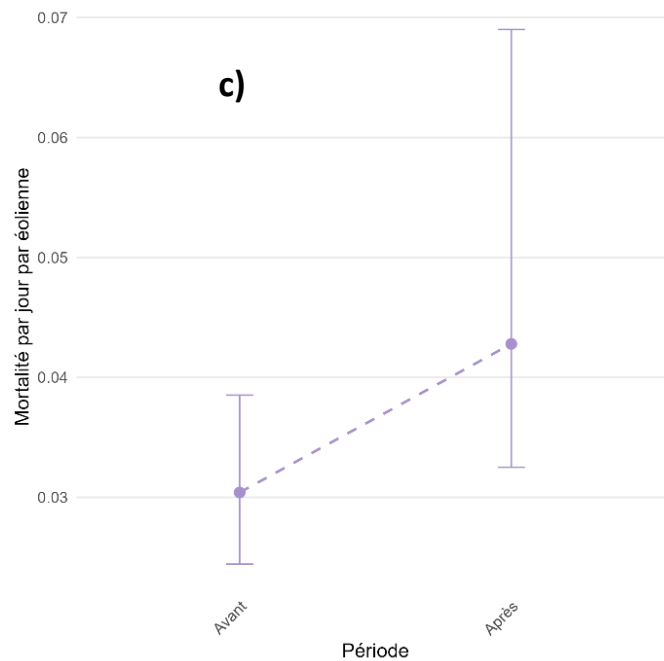
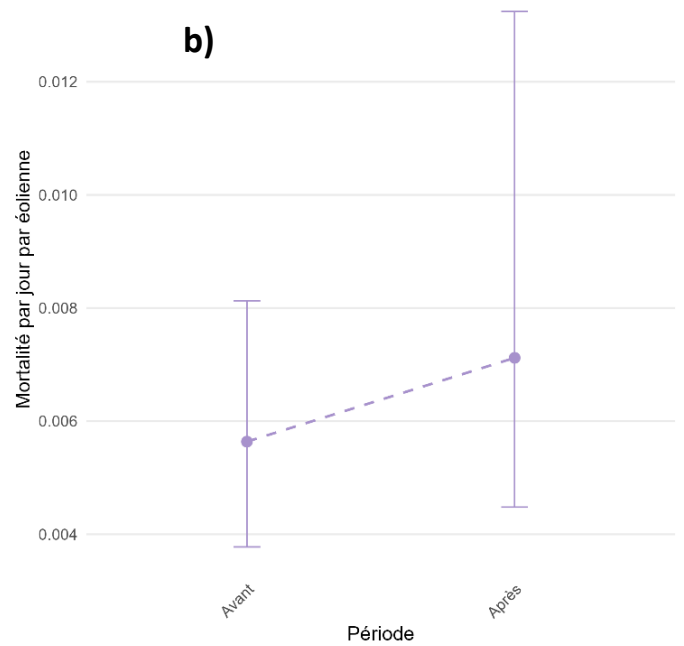
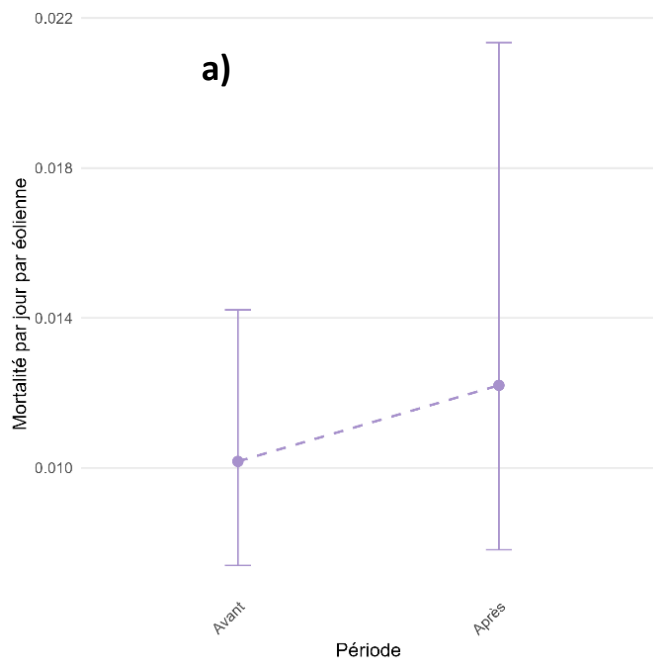
Annexe 3 : Résultat des estimations renvoyées par les GLMM sur 1000 tirages de mortalités dans la distribution tronquée des mortalités estimées (*bootstrap*) pour les 20 parcs et leurs témoins.

Les jeux de données concernent : **a)** des espèces de plus de 50 cm d'envergure, **b)** des espèces de plus de 100 cm d'envergure et **c)** toutes les espèces.



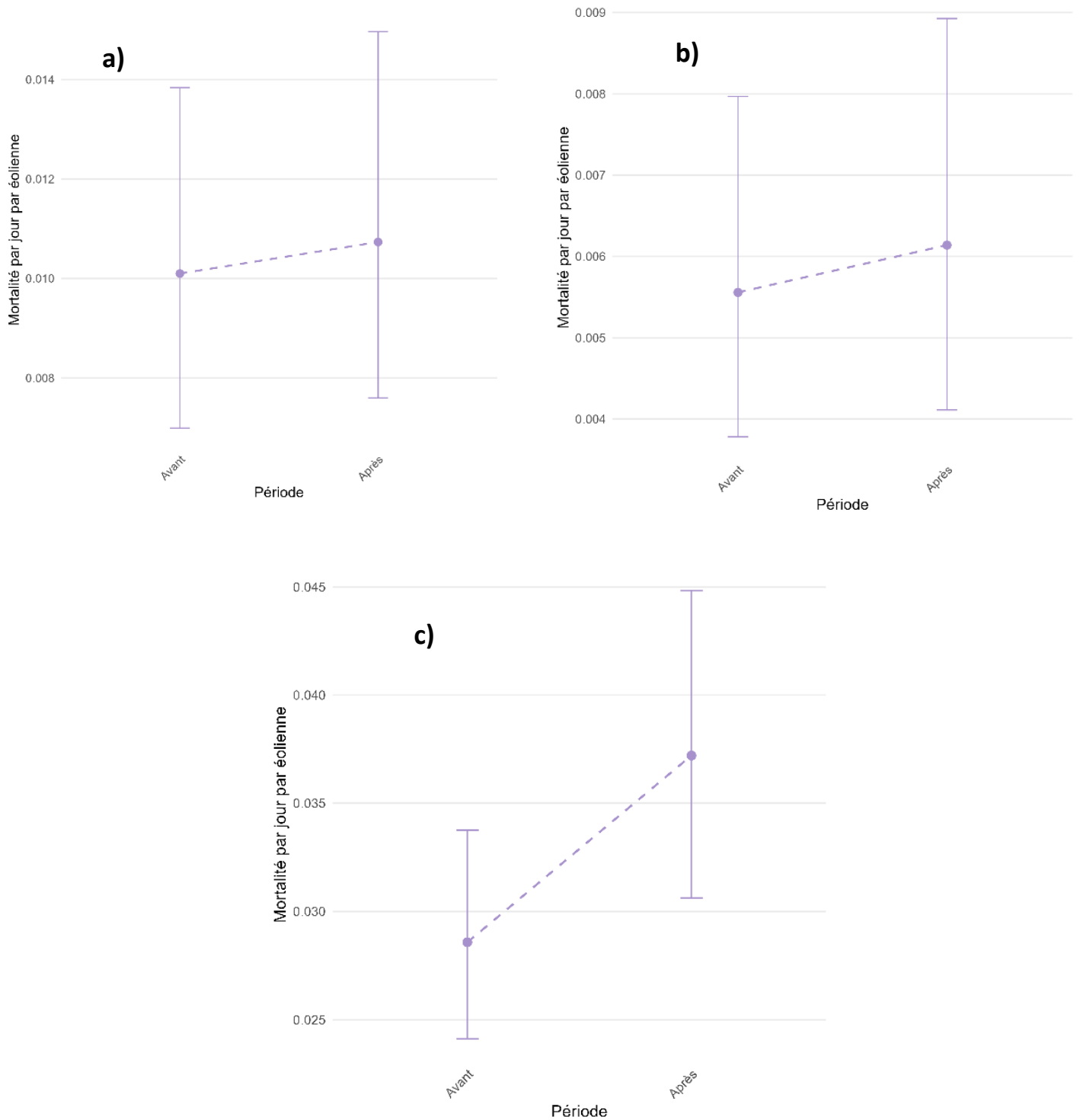
Annexe 4 : Résultat des estimations renvoyées par le GLMM sur 1000 tirages de mortalités dans la distribution brutes des mortalités estimées (bootstrap) pour les 25 parcs équipés de SDA.

Les jeux de données concernent : **a)** les espèces d'envergure supérieur à 50cm, **b)** les espèces d'envergure supérieur à 100cm et **c)** toutes les espèces.



Annexe 5 : Résultat des estimations renvoyées par le GLMM sur 1000 tirages de mortalités dans la distribution tronquée des mortalités estimées (bootstrap) pour les 25 parcs équipés de SDA.

Les jeux de données concernent : **a)** les espèces d'envergure supérieur à 50cm, **b)** les espèces d'envergure supérieur à 100cm et **c)** toutes les espèces.

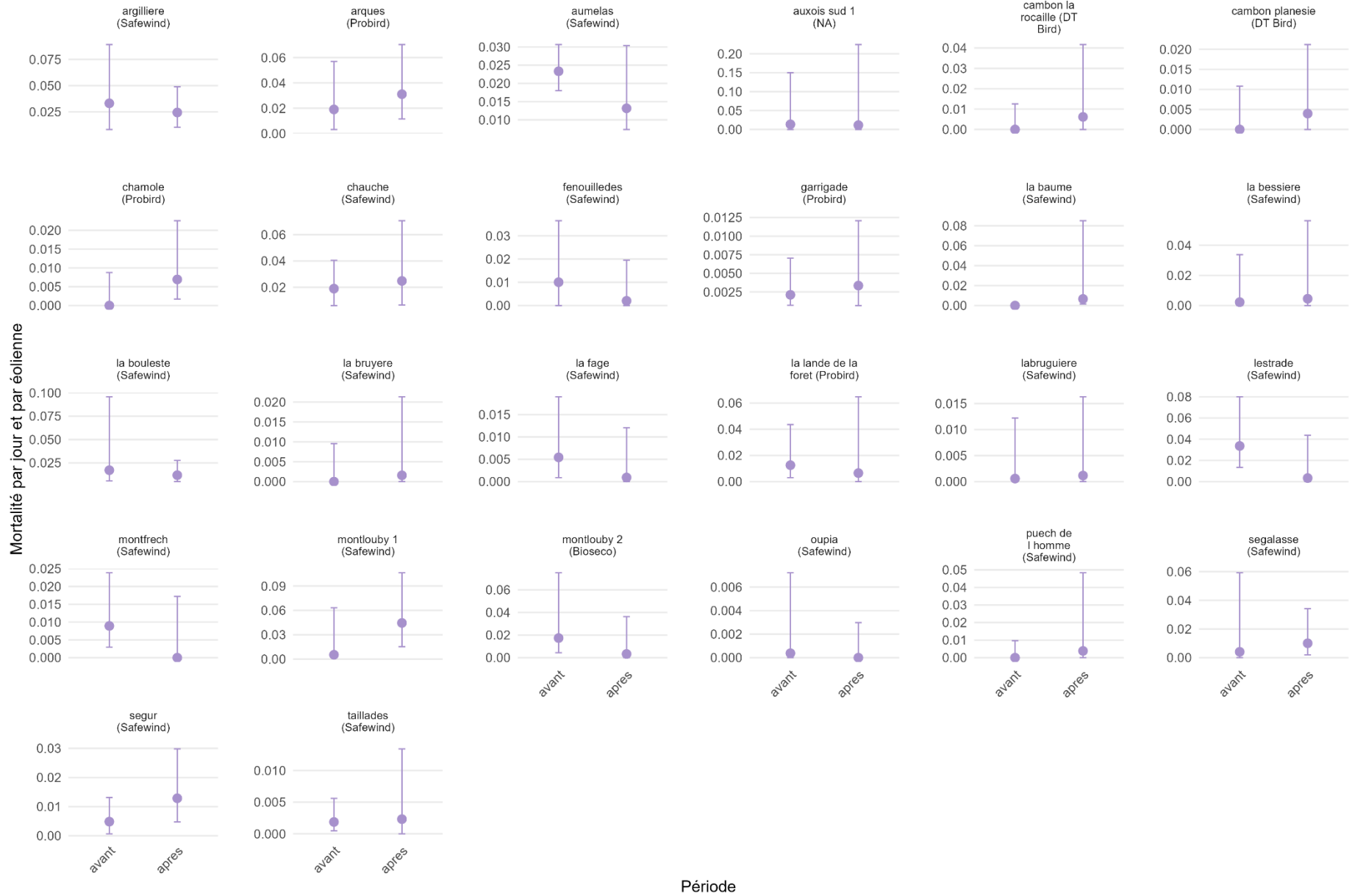


Annexe 6 : Listes des espèces d'envergure supérieure à 50 cm (a + b), supérieure à 100 cm (b), supérieure à 120 cm (c + d) et supérieure à 140 cm (d)

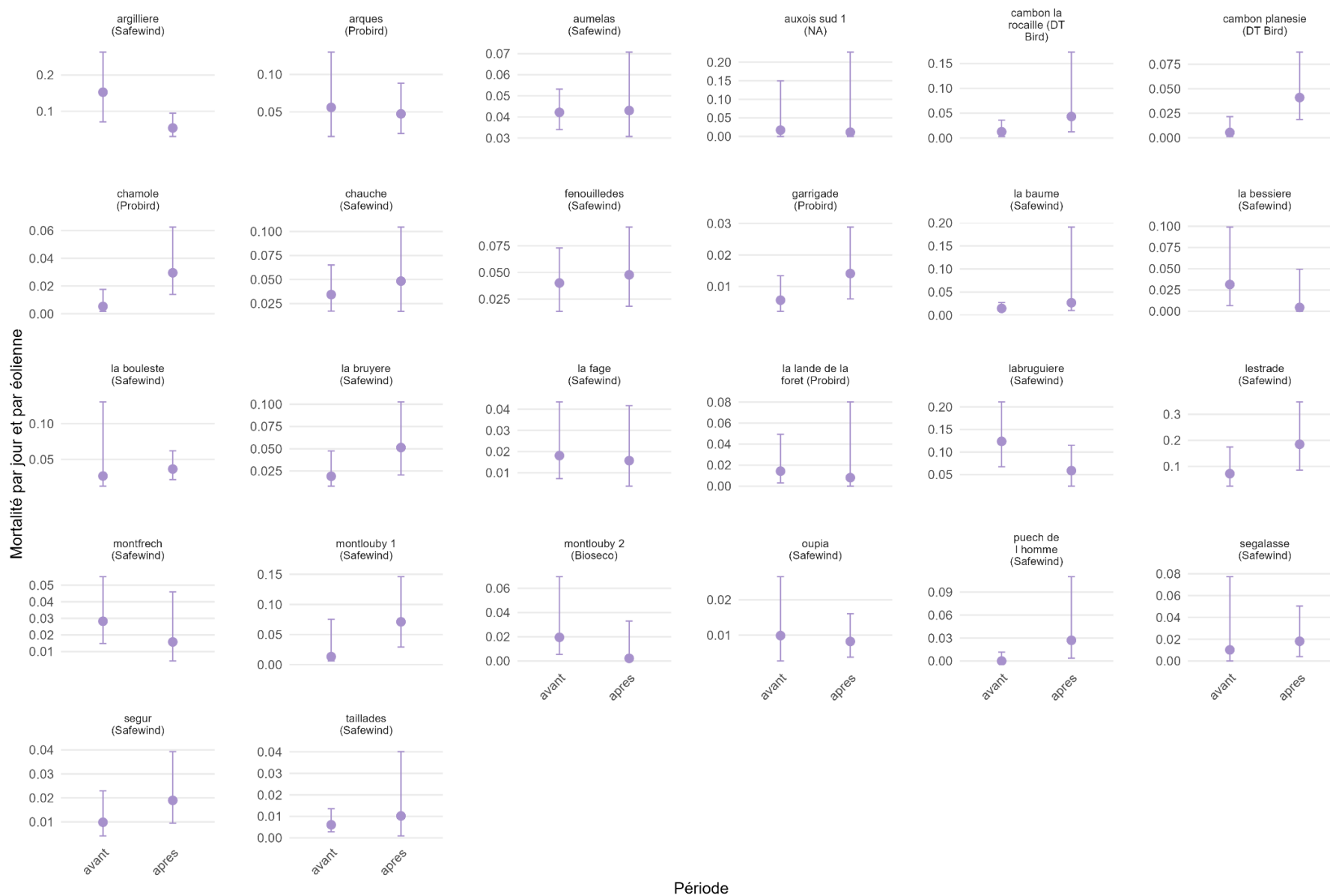
Nom vernaculaire français	Nom latin	Classes d'envergure analyses	
		principales	complémentaires
Aigle botté	<i>Hieraaetus pennatus</i>	b	c
Aigle criard	<i>Aquila clanga</i>	b	d
Aigle de Bonelli	<i>Aquila fasciata</i>	b	d
Aigle royal	<i>Aquila chrysaetos</i>	b	d
Aigrette garzette	<i>Egretta garzetta</i>	a	
Autour des palombes	<i>Accipiter gentilis</i>	b	
Balbusard pêcheur	<i>Pandion haliaetus</i>	b	d
Bernache du Canada	<i>Branta canadensis</i>	a	
Bihoreau gris	<i>Nycticorax nycticorax</i>	b	
Bondrée apivore	<i>Pernis apivorus</i>	b	c
Busard cendré	<i>Circus pygargus</i>	b	
Busard des roseaux	<i>Circus aeruginosus</i>	b	c
Busard Saint-Martin	<i>Circus cyaneus</i>	b	
Buse variable	<i>Buteo buteo</i>	b	c
Butor étoilé	<i>Botaurus stellaris</i>	b	c
Choucas des tours	<i>Coloeus monedula</i>	a	
Cigogne blanche	<i>Ciconia ciconia</i>	b	d
Cigogne noire	<i>Ciconia nigra</i>	b	d
Circaète Jean-le-Blanc	<i>Circaetus gallicus</i>	b	d
Corbeau freux	<i>Corvus frugilegus</i>	a	
Corneille noire	<i>Corvus corone</i>	a	
Crabier chevelu	<i>Ardeola ralloides</i>	a	
Cygne tuberculé	<i>Cygnus olor</i>	b	d
Élanion blanc	<i>Elanus caeruleus</i>	a	
Épervier d'Europe	<i>Accipiter nisus</i>	a	
Faucon crécerelle	<i>Falco tinnunculus</i>	a	
Faucon crécerellette	<i>Falco naumanni</i>	a	
Faucon émerillon	<i>Falco columbarius</i>	a	
Faucon hobereau	<i>Falco subbuteo</i>	a	
Faucon pèlerin	<i>Falco peregrinus</i>	a	
Goéland cendré	<i>Larus canus</i>	b	
Goéland leucophée	<i>Larus michahellis</i>	b	d
Grand corbeau	<i>Corvus corax</i>	b	c
Grand cormoran	<i>Phalacrocorax carbo</i>	b	d
Grande Aigrette	<i>Ardea alba</i>	b	d
Grue cendrée	<i>Grus grus</i>	b	d
Gypaète barbu	<i>Gypaetus barbatus</i>	b	d
Héron cendré	<i>Ardea cinerea</i>	b	d
Héron garde-bœufs	<i>Bubulcus ibis</i>	a	
Héron pourpré	<i>Ardea purpurea</i>	b	c
Ibis falcinelle	<i>Plegadis falcinellus</i>	a	
Milan noir	<i>Milvus migrans</i>	b	d
Milan royal	<i>Milvus milvus</i>	b	d

Oie cendrée	Anser anser	b	d
Pigeon biset	Columba livia	a	
Pigeon ramier	Columba palumbus	a	
Pygargue à queue blanche	Haliaeetus albicilla	b	d
Vautour fauve	Gyps fulvus	b	d
Vautour moine	Aegypius monachus	b	d
Vautour percnoptère	Neophron percnopterus	b	d

Annexe 7 : Résultat des estimations renvoyées par le GLMM sur les médianes des distributions tronquées des mortalités estimées pondérées par l'erreur standard pour chacun des 26 parcs sur des espèces de plus de 50 cm d'envergure.



Annexe 8 : Résultat des estimations renvoyées par le GLMM sur les médianes des distributions tronquées des mortalités estimées pondérées par l'erreur standard pour chacun des 26 parcs sur toutes les espèces.



Annexe 9 : Résumé des résultats de notre recensement des parcs éoliens équipés de SDA en France en comparaison du recensement réalisé par France renouvelables en avril 2024.

Région	Nombre de parcs équipés de SDA d'après le recensement d'EFFICAS	Nombre de parcs équipés de SDA d'après France renouvelables	Commentaire
Centre-Val de Loire	0	3	Pas de SDA équipé actuellement d'après la DREAL Centre-Val de Loire
Hauts-de-France	2	4	Pas de réponse pour les départements de l'Aisne, le Nord et l'Oise
Pays-de-la-Loire	3	7	Pas de réponse pour les départements du Maine-et-Loire, la Sarthe et la Mayenne
Normandie	2	0	
Auvergne-Rhône-Alpes	9	6	
Bourgogne-Franche-Comté	17	12	Manque certaines dates de mise en place et modèles des SDA
Bretagne	1	1	
Grand-Est	21	30	Retour obtenu sur tous les départements de la part de la DREAL Grand-Est
Nouvelle-Aquitaine	5	5	
Occitanie	64	40	
PACA	1	1	
Ile-de-France	0	0	
Corse	0	0	

Annexe 10 : Détails des rapports de suivis de mortalité utilisés.

Chaque ligne correspond à une année de suivi de mortalité pour un parc donné, distinguant les périodes avant et après la mise en place du SDA. La colonne Type précise si le parc suivi est équipé d'un SDA ou s'il s'agit d'un parc témoin sans dispositif. Les colonnes BACI, BA et Parc par parc indiquent l'inclusion de l'année de suivi dans les analyses correspondantes grâce au symbole X. La colonne ID couple parc pour BACI identifie les associations entre parcs équipés et leurs parcs témoins utilisés dans l'analyse BACI. Les années des rapports de mortalité antérieurs à 2018 apparaissent en orange, correspondant à des données collectées avant la mise à jour des protocoles.

PARCS	TYPE (SDA/TEMOIN)	ANNEES	PERIODE (AVANT/APRES)	BACI	ID COUPLE PARC POUR BACI	BA	PARC PAR PARC
FENOUILLEDES	SDA	2019	Avant			X	X
		2020	Avant	X	01	X	X
		2021	Après	X	01	X	X
ALBINE	Témoin	2019	Avant	X	01		
		2020	Avant	X	01		
		2021	Après	X	01		
LESTRADE	SDA	2019	Avant	X	02	X	X
		2021	Avant	X	02	X	X
		2022	Après	X	02	X	X
SALLES CURAN	Témoin	2011	Avant	X	02		
		2022	Après	X	02		
MONTFRECH	SDA	2018	Avant	X	03		
		2019	Avant			X	X
SEGUR	Témoin	2020	Après	X	03	X	X
		2021	Après	X	03		
SEGALASSE	SDA	2019	Avant	X	04	X	X
		2020	Avant	X	04	X	X
		2021	Avant	X	04	X	X
		2022	Après	X	04	X	X
BOIS DE MERDELOU	Témoin	2018	Avant	X	04		
		2022	Après	X	04		
ARQUES	SDA	2019	Avant	X	05	X	X
		2020	Avant	X	05	X	X
		2021	Après	X	05	X	X
LA BOULESTE	Témoin	2019	Avant	X	05		
		2021	Après	X	05		
LA BAUME	SDA	2018	Avant	X	06	X	X
		2020	Après	X	06	X	X
		2022	Après	X	06	X	X
FAYDUNES	Témoin	2019	Avant	X	06		

		2020	Après	X	06		
		2022	Après	X	06		
CAMBON LA ROCAILLE	SDA	2019	Avant	X	07	X	X
		2020	Après	X	07	X	X
		2021	Après	X	07	X	X
BOIS DE LAUSE	Témoin	2015	Avant	X	07		
		2019	Avant	X	07		
		2022	Après	X	07		
CAMBON LA PLANESIE	SDA	2019	Avant	X	08	X	X
		2020	Après	X	08	X	X
		2021	Après	X	08	X	X
BOIS DE LAUSE	Témoin	2015	Avant	X	08		
		2019	Avant	X	08		
		2022	Après	X	08		
AUMELAS	SDA	2013	Avant	X	09	X	X
		2018	Après	X	09	X	X
		2021	Après	X	09	X	X
DIO ET VALQUIERES	Témoin	2006	Avant	X	09		
		2019	Après	X	09		
TAILLADES	SDA	2020	Avant	X	10	X	X
		2021	Après	X	10	X	X
		2023	Après	X	10	X	X
REZENTIERES	Témoin	2013	Avant	X	10		
		2022	Après	X	10		
LABRUGUIERE	SDA	2019	Avant	X	11	X	X
		2020	Après	X	11	X	X
ALBINE	Témoin	2019	Avant	X	11		
		2020	Après	X	11		
ARGILLIERE	SDA	2019	Avant	X	12	X	X
		2022	Après	X	12	X	X
LES PLAINES	Témoin	2020	Avant	X	12		
		2022	Après	X	12		
LA BESSIERE	SDA	2022	Avant	X	13	X	X
		2023	Après	X	13	X	X
LA ROUQUETTE	Témoin	2022	Avant	X	13		
		2023	Après	X	13		
PUECH DE L'HOMME	SDA	2022	Avant	X	14	X	X
		2023	Après	X	14	X	X
LA ROUQUETTE	Témoin	2022	Avant	X	14		
		2023	Après	X	14		
CHAUCHE	SDA	2020	Avant	X	15	X	X
		2021	Avant	X	15	X	X
		2022	Après	X	15	X	X
GRANDS GATS	Témoin	2019	Avant	X	15		
		2020	Avant	X	15		
		2021	Avant	X	15		
		2022	Après	X	15		
MONTLOUBY 1	SDA	2016	Avant			X	X
		2018	Avant	X	16	X	X
		2019	Avant	X	16	X	X
		2022	Après	X	16	X	X
REZENTIERES	Témoin	2013	Avant	X	16		

		2022	Après	X	16		
MONTLOUBY 2	SDA	2019	Avant				X
		2020	Avant				X
		2022	Après				X
		2020	Avant				X
LA LANDE DE LA FORET	SDA	2021	Avant	X	17	X	X
		2022	Après	X	17	X	X
		2023	Après	X	17	X	X
		2021	Avant	X	17		
BULEON	Témoin	2022	Après	X	17		
		2014	Avant			X	X
SEGUR	SDA	2020	Avant	X	18	X	X
		2023	Après	X	18	X	X
		2022	Avant	X	18		
LA ROUQUETTE	Témoin	2023	Après	X	18		
		2019	Avant			X	X
LA BOULESTE	SDA	2021	Avant			X	X
		2022	Avant			X	X
		2023	Après			X	X
		2021	Avant			X	X
LA FAGE	SDA	2023	Après			X	X
		2018	Avant	X	19	X	X
GARRIGADE	SDA	2022	Après	X	19	X	X
		2011	Avant	X	19		
SALLES CURAN	Témoin	2022	Après	X	19		
		2019	Avant	X	20	X	X
LA BRUYERE	SDA	2022	Après	X	20	X	X
		2019	Avant	X	20		
LA BOULESTE	Témoin	2022	Après	X	20		
		2018	Avant			X	X
CHAMOLE	SDA	2019	Après			X	X
		2021	Avant			X	X
OUIA	SDA	2024	Après			X	X
		2020	Avant			X	X
AUXOIS SUD 1	SDA	2022	Après			X	X

Annexe 11 : Changements de mesures de réduction au cours du temps sur les parcs équipés de SDA.

Avant = pas de SDA mais parfois d'autres mesures appliquées

Après = SDA avec bridage, parfois complétement par d'autres mesures

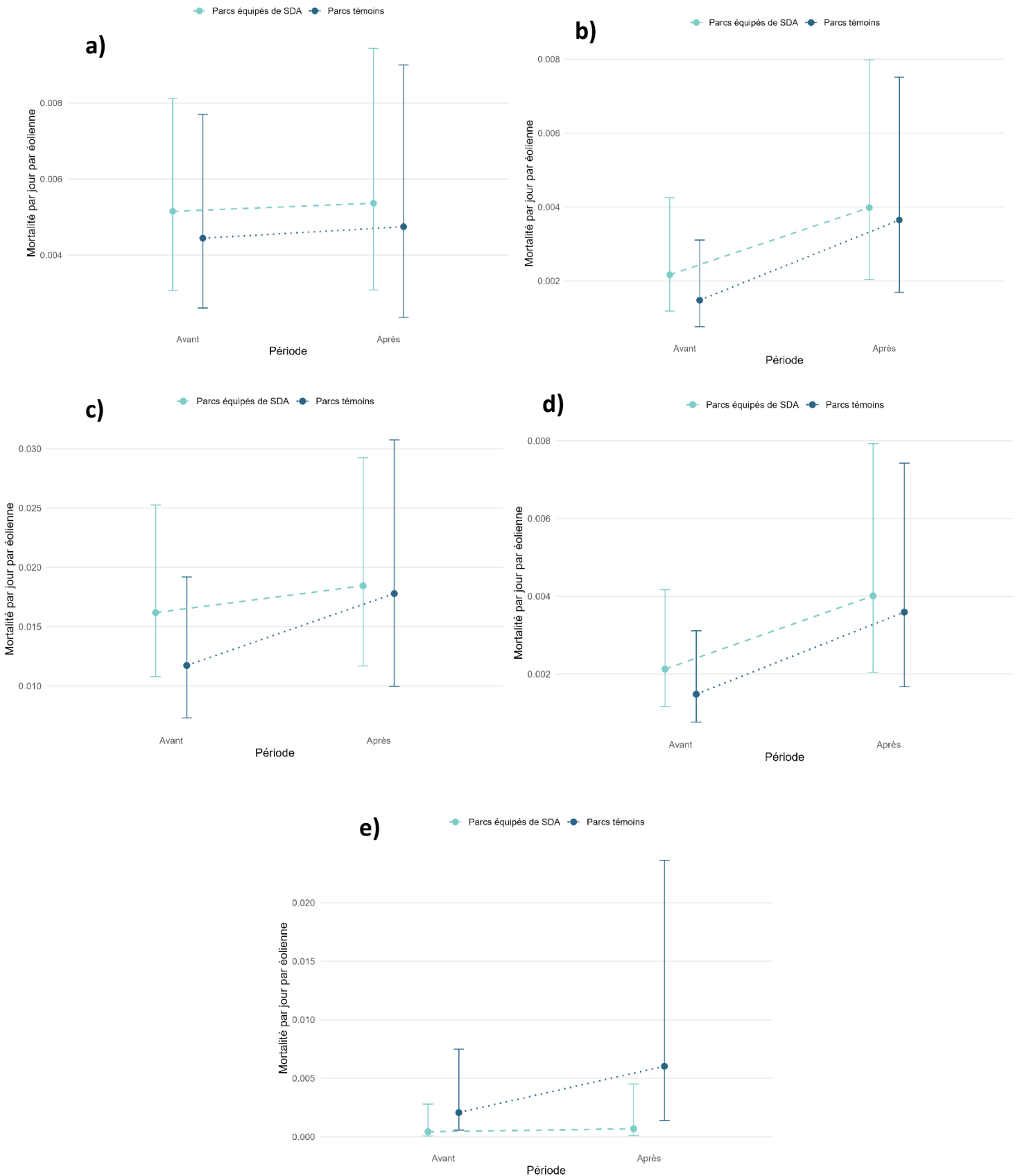
Pour trois parcs (en rouge) un SDA a été mis en place sans savoir précisément quelles modalités ont été appliquées (arrêt et/ou de l'effarouchement sonore).

PARCS	MESURES DE REDUCTION AVANT	MESURES DE REDUCTION COMPLEMENTAIRES APRES
FENOUILLEDES		Effarouchement sonore
LESTRADE		Effarouchement sonore
MONTFRECH	Arrêt manuel par observateurs humains d'octobre 2019 jusqu'à mise en place du SDA 01/12/2019 : période non utilisée dans les analyses	
SEGALASSE		
ARQUES		Effarouchement sonore
LA BAUME	Effarouchement sonore + arrêt du parc	Effarouchement sonore. Evolution du paramétrage courant 2020.
CAMBON LA ROCAILLE		Effarouchement sonore
CAMBON LA PLANESIE		Effarouchement sonore
AUMELAS		Effarouchement sonore
TAILLADES		Effarouchement sonore
LABRUGUIERE		Effarouchement sonore
ARGILLIERE		
LA BESSIERE	Début d'équipement du SDA sur certaines éoliennes	
PUECH DE L'HOMME	Début d'équipement du SDA sur certaines éoliennes	
CHAUCHE		Effarouchement sonore
MONTLOUBY 1	Effarouchement sonore	Effarouchement sonore

MONTLOUBY 2	
LA LANDE DE LA FORET	Effarouchement sonore. Evolution du paramétrage courant 2022.
SEGUR	
LA BOULESTE	Effarouchement sonore
LA FAGE	
GARRIGADE	
LA BRUYERE	
CHAMOLE	Effarouchement sonore
OUIA	
AUXOIS SUD 1	

Annexe 12 : Résultat des estimations renvoyées par le GLMM sur les médianes des distributions brutes des mortalités estimées pondérées par l'erreur standard pour les 19 parcs avec bridage actif et leurs témoins.

Les jeux de données concernent : **a)** des espèces de plus de 50 cm d'envergure, **b)** des espèces de plus de 100 cm d'envergure et **c)** toutes les espèces, **d)** des espèces de plus de 120 cm d'envergure, **e)** des espèces de plus de 140 cm d'envergure.



Annexe 13 : Résultat des estimations renvoyées par le GLMM sur les médianes des distributions brutes des mortalités estimées pondérées par l'erreur standard pour les 22 parcs avec bridage actif.

Les jeux de données concernent : **a)** des espèces de plus de 50 cm d'envergure, **b)** des espèces de plus de 100 cm d'envergure et **c)** toutes les espèces, **d)** des espèces de plus de 120 cm d'envergure, **e)** des espèces de plus de 140 cm d'envergure.

