

Ligne électrique HT 60 kV Cudrefin-Thielle, réserve du Fanel

Suivi de l'effet des balises anticollisions sur l'avifaune



Cernier, le 15.02.2022

Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Mentions légales

Mandant : Office fédéral de l'environnement (OFEV), Division Biodiversité et paysage, CH-3003 Berne

L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Mandataire : L'Azuré – Etudes en écologie appliquée

Auteur : Alain Lugon et Astrance Fenestraz

Accompagnement OFEV : Elisa Baer, Division Biodiversité et paysage, Section Gestion du paysage

Remarque : Le présent rapport a été réalisé sur mandat de l'OFEV. Seul le mandataire porte la responsabilité de son contenu.

Table des matières

Résumé	4
1 Introduction.....	5
2 Méthodes	6
3 Espèces observées.....	11
4 Résultats.....	12
Ensemble des espèces.....	12
Grands anatidés.....	13
Petits anatidés.....	13
Autres espèces	13
Influence de la luminosité	14
5 Discussion et recommandations	14
Disposition des balises	14
Effet des balises.....	14
6 Conclusion	15
Bibliographie consultée	16
Annexes.....	19
1. Méthode d'analyse.....	19
2. Analyses détaillées	21

Résumé

La ligne électrique haute tension 60 kV Thielle-Cudrefin a été équipée de balises anticollisions de type « FireFly » sur un tronçon d'environ 1 km à la hauteur de la réserve naturelle du Fanel. Un suivi visuel a été réalisé avant et après la pose des balises afin de décrire les comportements de franchissement de l'avifaune et d'évaluer la réduction du risque de collision sur l'avifaune.

Un effet positif des balises modéré à fort, plus ou moins marqué selon les groupes d'espèces, a pu être mis en évidence. Les principaux résultats de l'étude sont les suivants :

- La hauteur de vol des oiseaux approchant à 30 m de la ligne a augmenté de manière modérée mais significative après l'installation des balises : hausse de 6,2 % de la proportion d'oiseaux approchant de la ligne à une hauteur plus élevée que les câbles, jusqu'à 25 % pour les canards
- Les comportements à risque, caractérisés par une réaction soudaine d'évitement de la ligne, ont été réduits de deux tiers pour l'ensemble des espèces, et de quatre cinquièmes pour les canards ; le taux de réaction à risque pour les oiseaux approchant la ligne au niveau des câbles conducteurs a été réduit de 19,7 % pour l'ensemble des espèces
- La distance de réaction face à la ligne a augmenté ; cela se traduit par des comportements d'évitement intervenant à plus grande distance de la ligne, de l'ordre de 8,2 m en moyenne, et par une diminution des réactions soudaines intervenant à moins de 30 m de la ligne
- La différence de risque de collision entre le centre et les extrémités des portées (plus visibles du fait de la présence des pylônes) disparaît avec la pose des balises
- Les balises ont également démontré leur efficacité par conditions de faible luminosité, avant le lever du soleil

Les résultats suggèrent que les balises permettent aux oiseaux de détecter les câbles à plus grande distance et de mieux anticiper le franchissement de la ligne, en particulier pour les petits anatidés (canards, harles, etc.). La modification des comportements réduit sensiblement le risque de collision. Cette mesure contribue à la protection des oiseaux et en particulier à celle des anatidés sur ce site d'importance nationale et internationale pour l'avifaune.

1 Introduction

La ligne électrique haute tension 60 kV Thielle - Cudrefin (Figure 1) traverse la réserve naturelle du Fanel classée à l'inventaire OROEM (ordonnance sur les réserves d'oiseaux d'eau et de migrateurs d'importance internationale et nationale). Utilisée uniquement comme ligne de secours, elle présente principalement un risque de collision pour l'avifaune.

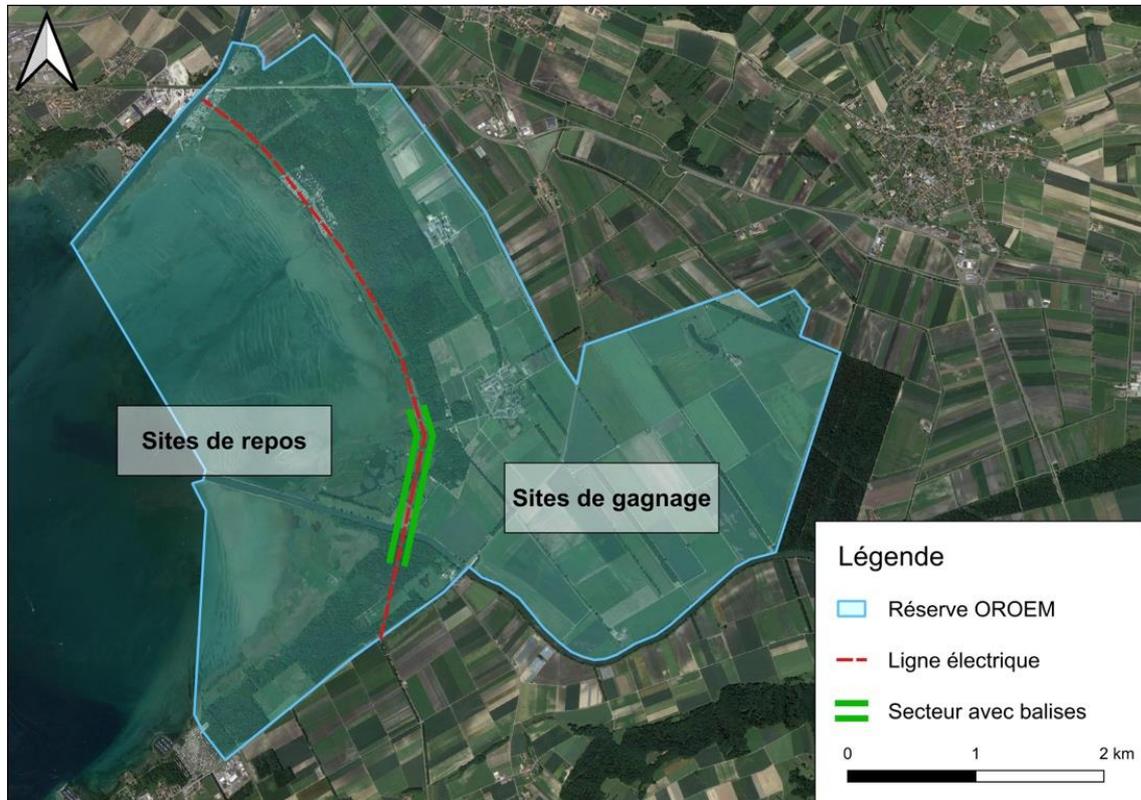


Figure 1 : Localisation de la ligne électrique Thielle - Cudrefin, périmètre de la réserve OROEM du Fanel, utilisation de la région par les oiseaux d'eau et tronçon de ligne équipé avec des balises

Le risque de collision pour un oiseau traversant l'axe de la ligne est étroitement lié aux caractéristiques morphologiques et comportementales spécifiques (APLIC 2012, FNN-VDE 2014). Il concerne en particulier les espèces ou groupes d'espèces suivants :

- Espèces peu manœuvrables avec des ailes larges et courtes ou un poids élevé, tels que les canards ou les oies (Bevanger 1998)
- Espèces avec une vision subaquatique développée, myopes en l'air (vision lointaine floue), par ex. les anatidés (Jones *et al.* 2007), et espèces avec une faible vision binoculaire à l'avant (voire un angle mort), comme les cygnes ou les grues (Martin & Shaw 2010)
- Espèces volant en groupe ou nichant en colonie près d'une ligne électrique

Dans le cas de la ligne du Fanel, le risque est augmenté par plusieurs facteurs :

- Proximité avec un site d'escale et d'hivernage majeur pour les oiseaux d'eau au niveau national et international

- Proximité avec une importante colonie de grands cormorans, nichant dans un rideau d'arbres situé à une centaine de mètres de la ligne
- Ligne séparant les sites de repos (sur le lac) et de gagnage (dans les cultures) ; la majorité des vols se font plusieurs fois par jour, à une faible hauteur et perpendiculairement à la ligne
- Ligne coupant le couloir de vol que constitue le canal de la Broye
- Faible hauteur de la ligne (hauteur moyenne : 22 m)
- Arrangement vertical des câbles créant un effet d'écran

A l'approche de la ligne, les oiseaux peuvent montrer des comportements d'évitement dont certains attestent d'un risque de collision. Plus une réaction d'évitement est vive et déclenchée à faible distance de la ligne, plus le risque de collision est élevé. L'observation des comportements de franchissement permet ainsi de décrire le risque encouru par les différentes espèces. En effet, Murphy *et al.* (2016) ont pu démontrer la corrélation entre le taux de mortalité dû aux collisions et le taux de réaction.

Un suivi de la mortalité avienne réalisé sur cette ligne en 1993 et 1994 (Ecoconseil 1994) a estimé entre 0,8 et 1,4 le nombre de collisions par jour et par kilomètre de ligne (principalement des passereaux, canards et laridés). Afin de réduire ce risque, l'exploitant de la ligne (Groupe E) a décidé d'équiper un tronçon d'environ 1 km avec des balises anticollisions de type « FireFly » en décembre 2020 (Figure 5). Ces balises, suspendues aux câbles et pivotant sur elle-même avec le vent, sont recouvertes de plaques de couleur (jaune et orange) réfléchissant la lumière du jour et de réflecteurs luminescents visibles par les oiseaux dans l'obscurité (vision des UV). Leur efficacité a été attestée dans de nombreuses études (par ex. réduction de la mortalité sur des grues nord-américaines de 63 %, Brown & Drewien 1995).

La démarche revêt un caractère pilote en Suisse. De ce fait, il a été décidé avec les partenaires du projet (OFEV, Groupe E SA, BirdLife Suisse) de réaliser un suivi comportemental avant et après la pose des balises afin d'évaluer la réduction du risque de collision sur l'avifaune.

2 Méthodes

Deux portées de la ligne électrique du Fanel, à cheval sur les cantons de Berne, Fribourg et Vaud, ont fait l'objet du suivi (Figure 2) :

- Portée 1 (pylônes 126-127) : 165 m, traverse le canal de la Broye et un pâturage
- Portée 2 (pylônes 127-128) : 200 m, entièrement située sur des pâturages, coupe un cordon boisé

La phase de test réalisée en 2020 (L'Azuré 2021) a montré que le nombre de survols est très faible en journée et la nuit (observation avec un amplificateur de lumière et une caméra thermique), et peu élevé au crépuscule, excepté pour les anatidés parfois plus abondants le soir qu'à l'aube. Il a donc été décidé de concentrer les périodes d'observation en début de matinée afin d'optimiser le suivi.

Avant la pose des balises, 30 sessions d'observation de 2 h ont été réalisées à l'aube (début 1 h avant l'heure du lever du soleil), 8 en journée et 8 au crépuscule (fin 1 h après le coucher du soleil), de début avril à mi-juin 2020. Après l'équipement de la ligne, 30 sessions ont été effectuées à l'aube et 15 au crépuscule, de début avril à fin mai 2021. Les observations ont été réalisées à vue et à l'aide de jumelles, par bonnes conditions de visibilité (absence de brouillard) et avec pluviosité faible à nulle. Durant une session, chaque portée était suivie pendant 1 h en alternance à partir du pylône central n°127.

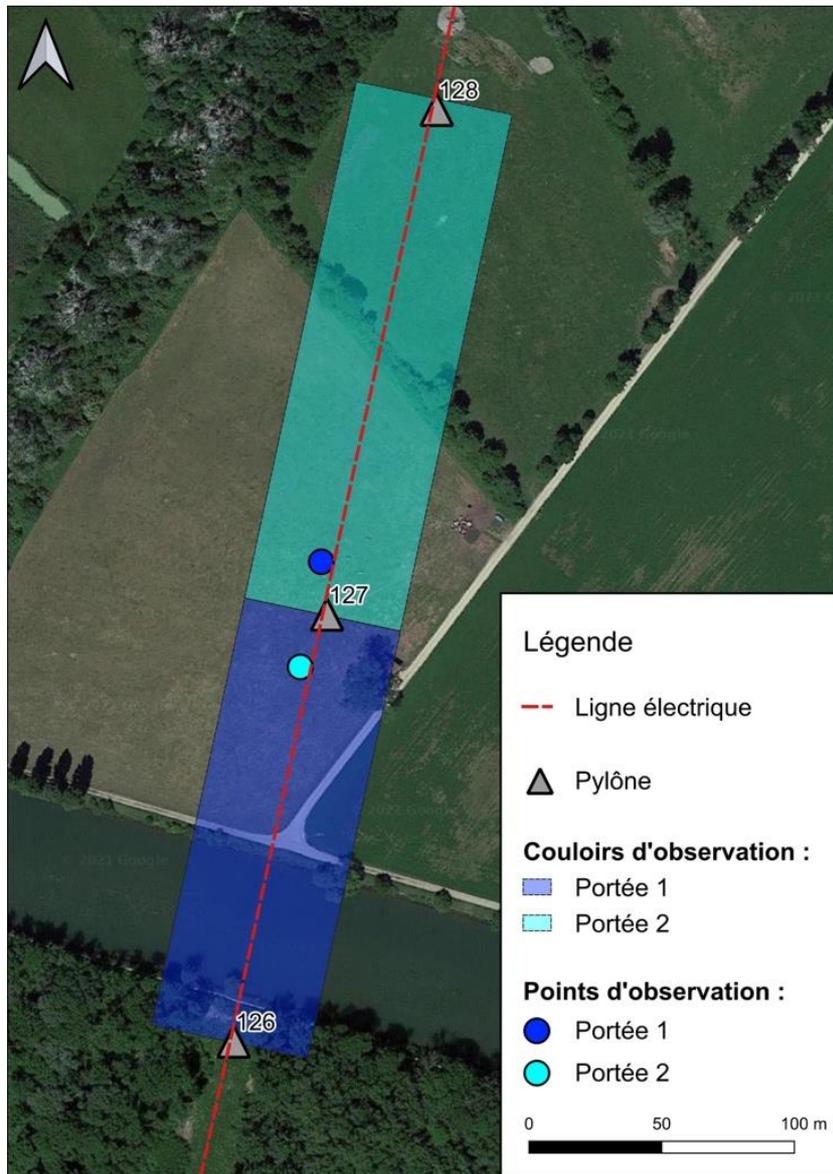


Figure 2 : Secteur d'étude avec couloirs d'observation de 30 m de chaque côté de la ligne et points d'observation pour chacune des portées



Figure 3 : Portée 1 traversant le canal de la Broye et pylône n°126 en rive gauche (vue vers le sud)



Figure 4 : Vue vers le nord avec extrémité nord de la portée 1 au premier plan, pylône n°127 (poste d'observation) et portée 2 ; l'arbre isolé est éloigné de ~30 m de la ligne et sert de point de repère pour estimer les distances de réaction ; les peupliers abritant la colonie de grands cormorans sont visibles sur la gauche



Figure 5 : Balise de type « FireFly » et câbles équipés fin 2020 au Fanel

Les données relevées et analysées dans le présent rapport sont les suivantes :

- Espèces : toutes les espèces ont été notées à l'exception de celles utilisant la ligne comme perchoir (rapaces, bergeronnette grise, étourneau, etc.) ou volant régulièrement à proximité de la ligne sans montrer de comportements à risque (goéland leucophée, corneille noire, hirondelles, etc.), ainsi que des oiseaux volant à plus de 10 m au-dessus de la ligne
- Classes de hauteur de vol d'approche (mesurée à une distance approximative de 30 m avant la ligne) et de franchissement de la ligne (Figure 6) :
 - H1. Entre le sol et 10 m sous la ligne
 - H2. De 10 m sous la ligne au câble conducteur inférieur
 - H3. Niveau des câbles conducteurs
 - H4. Entre le câble conducteur supérieur et le câble de garde
 - H5. Du câble de garde à 10 m au-dessus
- Comportement face à la ligne :
 - Aucune réaction = pas de risque de collision
 - Réaction anticipée avec montée lente et progressive = risque de collision faible
 - Réaction soudaine avec montée en flèche, descente brusque ou demi-tour = risque de collision élevé
- Distance de réaction soudaine face à la ligne :
 - < 20 m
 - 20-30 m
 - 31-50 m

- Tronçon de la portée (Figure 6) :
 - Centre (moitié centrale de la portée)
 - Extrémités (les deux quarts à proximité des pylônes)

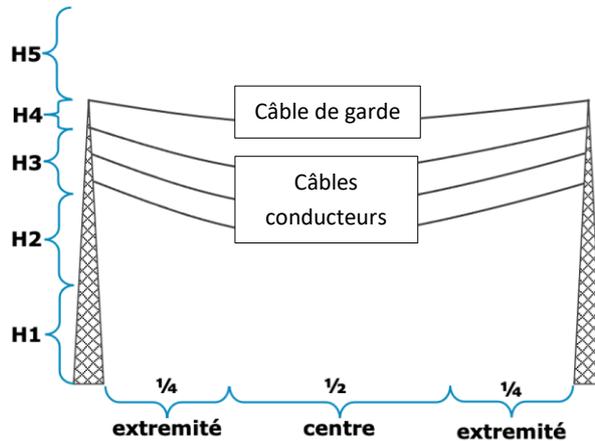


Figure 6 : Schéma d'une portée avec les classes de hauteur et les tronçons ; les trois câbles inférieurs représentent les conducteurs, le câble supérieur (câble de garde) sert de paratonnerre et ne conduit pas de courant ; catégories de hauteur : voir texte ci-dessus

Ces données permettent d'évaluer la proportion d'oiseaux franchissant la ligne en montrant des comportements d'évitement soudain, traduisant la surprise devant l'obstacle et générant des situations avec un risque de collision élevé. Nous avons estimé que les oiseaux approchant de la ligne en s'élevant progressivement percevaient l'obstacle assez tôt pour anticiper son évitement (risque de collision jugé faible), et que les oiseaux ne montrant aucune réaction n'étaient *a priori* pas gênés par l'obstacle et ne présentaient pas de risque de collision.

La hauteur de vol d'approche et la distance de réaction sont également des critères traduisant l'exposition au risque de collision. En effet, une approche à la hauteur des câbles est la plus risquée et plus une réaction intervient tôt, donc à plus grande distance de la ligne, plus l'oiseau a de temps et d'espace pour éviter l'obstacle.

L'analyse de l'état initial a permis d'établir une estimation du risque de collision et de définir la disposition des balises anticollisions (L'Azuré 2021). Les analyses reconduites l'année suivante selon le même protocole ont permis de mettre en évidence les différences comportementales liées à l'installation des balises. Les valeurs obtenues ont été comparées avec une méthode de *bootstrap* dans le logiciel R (cf. Annexe 1 Méthode d'analyse).

Les données ont été analysées pour l'ensemble des espèces comptabilisées et pour deux groupes d'espèces plus vulnérables face à la ligne électrique : grands anatidés (oies et cygnes) et petits anatidés (canards). Le comportement des courlis cendrés a également été examiné avant la pose des balises, mais trop peu d'individus ont été observés en 2021 pour permettre une comparaison. L'analyse comparative des différentes espèces regroupées selon leurs caractéristiques morphologiques et comportementales permet une meilleure compréhension de l'effet des balises (pour les caractéristiques de chaque groupe, voir Annexe 1. Méthode d'analyse).

Une évaluation de l'effet de la luminosité sur la visibilité de la ligne a été réalisée sur les sessions de l'aube, en distinguant les comportements avant et après le lever du soleil. La visibilité de la ligne

a été considérée comme faible jusqu'à 15 minutes après l'heure du lever de soleil et bonne par la suite. Une comparaison de la hauteur d'approche à 30 m, de la proportion de franchissements avec une réaction soudaine et de la distance à laquelle cette réaction intervient a été réalisée avant et après la pose des balises.

Enfin, deux caméras (modèle IPW-1080P-3GW de chez AMC) ont été installées au printemps 2020 par Groupe E sur le pylône n°126 (filmant la portée 1 au-dessus du canal de la Broye) et sur le n°127 (portée 2). Ces caméras enregistrent une séquence lorsqu'un mouvement est détecté par l'analyse du flux d'images. Elles sont restées en place jusqu'à l'été 2021. L'analyse détaillée des séquences enregistrées ne fait pas partie du présent rapport.

3 Espèces observées

21'644 observations de 24 espèces ont été relevées durant le suivi (Tableau 1). Le grand cormoran, nichant à proximité de la ligne, concentre à lui seul 86 % des observations. A l'aube, de grands groupes (> 200 ind.) partent en direction de l'est vers le lac de Morat et franchissent la ligne. Les retours sont beaucoup plus diffus. La grande proportion de cette espèce dans les données influence fortement les résultats globaux. Les analyses par espèces ou groupes d'espèces permettent de nuancer les résultats.

GROUPE	ESPECES	2020		2021	
		OCCURRENCE	PROPORTION	OCCURRENCE	PROPORTION
Cormoran	Cormoran	7708	86.8	10989	86
Grands anatisés	Oie cendrée	735	9.8	1425	11.9
	Bernache nonnette	-		2	
	Ouette d'Egypte	28		16	
	Tadorne casarca	27		-	
	Cygne tuberculé	84		81	
	<i>Sous-total</i>	874		1524	
Petits anatisés	Canard colvert	51	1.2	24	1.4
	Harle bièvre	31		36	
	Fuligule milouin	2		-	
	Nette rousse	1		7	
	Canard sp	17		114	
	<i>Sous-total</i>	102		181	
Echassiers	Héron cendré	56	1.4	50	0.5
	Courlis cendré	44		5	
	Cigogne	9		-	
	Grande Aigrette	8		5	
	Grue cendrée	2		-	
	<i>Sous-total</i>	119		60	
Rapaces	Busard des roseaux	2	-	-	-
	Busard St-Martin	1		-	
	Milan noir	29		2	
	Milan royal	2		-	
	Buse	1		-	
	<i>Sous-total</i>	35		2	
Autres	Pic vert	-	0.3	1	0.2
	Pigeon sp	-		7	
	Pigeon ramier	24		14	
	Coucou	3		-	
	Geai	1		-	
	<i>Sous-total</i>	28		22	
TOTAL		8866		12778	

Tableau 1 : Espèces observées et nombre de franchissement de la ligne électrique ; les groupes/espèces encadrés en bleu ont fait l'objet d'une analyse spécifique

4 Résultats

Ensemble des espèces

Les résultats suggèrent que l'installation des balises augmente la distance de détection de la ligne. La proportion d'oiseaux approchant à 30 m de la ligne en volant juste au-dessus de la hauteur des câbles a en effet légèrement augmenté (différence significative) après la pose des balises (de 58,6 % à 64,8 %, Figure 7 en annexe 2).

La majeure partie des franchissements ont lieu au-dessus du câble de garde. Très peu d'oiseaux tentent de passer entre les câbles (Figure 8). A plusieurs reprises, des individus ont néanmoins franchi la ligne en passant entre les câbles non équipés de balises, évitant de justesse la collision. Suite à la pose des balises, quelques oiseaux traversent encore entre le câble conducteur supérieur et le câble de garde, cependant aucune observation d'oiseaux traversant la ligne entre les câbles conducteurs n'a été réalisée.

La majorité des oiseaux approchant la ligne à la hauteur des câbles (catégories de hauteur H3 et H4) s'élèvent pour la franchir au-dessus. La pose des balises n'a eu aucune influence sur la hauteur de franchissement.

L'installation des balises entraîne une importante réduction du taux de réaction à risque en fonction de la hauteur d'approche, passant de 54,5 % à 34,8 % pour les oiseaux approchant la ligne au niveau des câbles conducteurs et de 17,9 % à 8 % pour les vols à la hauteur du câble de garde (Figure 9). Il est intéressant de remarquer qu'un tiers des oiseaux approchant à une hauteur inférieure à la ligne la perçoivent comme un obstacle et la franchissent par-dessus.

La proportion d'oiseaux montrant une réaction en approchant de la ligne a diminué avec la pose des balises (de 39,1 % à 30 %). Les comportements d'évitement soudain, traduisant une détection tardive de l'obstacle, concernent 12,9 % des oiseaux observés avant la pose des balises (1'142 données). Ils ont été réduits de deux tiers après l'installation des balises (Figure 10). Cette diminution importante est identique sur les deux portées étudiées. Ces observations suggèrent que l'obstacle est mieux détecté avec la présence des balises.

Les réactions soudaines interviennent à plus grande distance après marquage de la ligne, (augmentation de la distance moyenne de réaction de l'ordre de 8 m, Figure 11). Ces réactions plus précoces laissent plus de temps aux oiseaux de manœuvrer pour éviter la ligne et diminuent ainsi le risque de collision.

En l'absence des balises, les extrémités des portées, sans doute mieux détectées que les parties centrales du fait de la présence des pylônes, induisent une proportion plus faible de comportements à risque (meilleure anticipation de l'obstacle). Cette différence s'estompe entièrement après l'installation des balises (Figure 18). La visibilité des câbles au centre des portées est donc renforcée grâce aux balises.

La portée 1, traversant le canal de la Broye, est plus fréquentée (63 % des passages, proportion inchangée après l'installation des balises) que la portée 2. Le canal joue un rôle de couloir pour de nombreux oiseaux, en particulier pour les canards.

Grands anatidés

Les oies cendrées se déplacent quotidiennement entre leur site de repos sur le lac et un important site de nourrissage situé dans les champs à l'est de la ligne, qui représente ainsi un obstacle à franchir. Les résultats des analyses traduisent avant tout le comportement de cette espèce, prédominante dans le groupe des grands anatidés (Tableau 1).

La pose des balises n'a modifié ni la proportion d'oiseaux approchant de la ligne à la hauteur des câbles (Figure 12), ni la proportion montrant une réaction en approchant de la ligne (Figure 13). La moitié des oiseaux réagissent, majoritairement par une adaptation lente et anticipée de leur hauteur de vol. La proportion d'évitements brusques est assez faible et n'a pas évolué.

La principale modification comportementale induite par la pose des balises est liée à la distance de réaction des oiseaux montrant un comportement d'évitement soudain. Ces réactions se produisent en moyenne 8 m plus loin de la ligne et concernent presque trois fois plus d'individus à plus de 30 m de la ligne (Figure 14). La détection de la ligne par les oies et les cygnes est donc clairement renforcée par les balises.

Petits anatidés

L'installation des balises a fortement modifié le comportement des canards, en augmentant d'environ 25 % le nombre d'individus approchant la ligne au-dessus des câbles (Figure 15). Cette différence de proportion se reflète dans les résultats concernant les oiseaux ne montrant aucune réaction lors du franchissement de la ligne, passant de 57,8 % à 78,5 %. Le nombre de réaction à risque à quant à lui été divisé d'un facteur 5 (Figure 16).

Enfin, la proportion d'oiseaux montrant une réaction soudaine à moins de 30 m de la ligne a diminué de 29,2 % suite à la pose des balises (valeur indicatrice d'une tendance malgré le faible nombre d'individus avec réaction à risque ; Figure 17).

Ce faisceau d'observations suggère que la ligne équipée de balises est mieux détectée par les petits anatidés.

Autres espèces

Les courlis cendrés réagissent avec anticipation et pour la plupart à plus de 30 m de la ligne non équipée de balises. Ils approchent de la ligne en volant à une hauteur supérieure au câble de garde, pour se rendre dans les champs régulièrement inondés à l'est de la route cantonale. La ligne électrique ne semble pas constituer un obstacle à risque pour cette espèce dans la configuration du Fanel.

Des événements observés de manière plus anecdotique donnent une idée du risque de collision encouru par les grandes espèces peu manœuvrables. A titre d'exemple, deux groupes de cigognes blanches ont eu la même réaction face à la ligne non équipée de balises : elles se sont séparées 30 m avant la ligne, pour ensuite rapidement monter au-dessus des câbles.

Influence de la luminosité

En absence de balises, le risque de collision est plus élevé par faible luminosité, lorsque la ligne est peu visible : pour l'ensemble des espèces, les situations à risque sont en effet plus nombreuses avant qu'après le lever du soleil. Par faible visibilité, plus d'oiseaux franchissent la ligne en montrant une réaction soudaine ou anticipée, en arrivant à la hauteur des câbles et en réagissant soudainement à plus faible distance de la ligne, traduisant une moins bonne détection de l'obstacle (Figure 19).

L'effet des balises s'observe aussi bien par faible que par bonne luminosité. L'amélioration liée à l'installation des balises semble même plus élevée lorsque la luminosité est faible pour les trois facteurs analysés (Figure 19). Les balises FireFly, équipées de réflecteurs luminescents visibles par les oiseaux dans l'obscurité, rendent ainsi la ligne plus détectable à l'aube, avant le lever du soleil, lorsque l'intensité de franchissement est la plus élevée.

5 Discussion et recommandations

Disposition des balises

Dans la littérature consultée, le câble de garde est souvent mentionné comme plus dangereux que les câbles conducteurs, du fait que les oiseaux franchissent généralement les lignes en s'élevant au-dessus des câbles. Plusieurs auteurs recommandent d'équiper uniquement le câble de garde à l'aide de balises anticollisions (Jenkins *et al.* 2010). Le suivi réalisé sur la ligne du Fanel a montré qu'en absence des balises, plus de la moitié des oiseaux arrivant à la hauteur des conducteurs et un tiers de ceux volant plus bas que les conducteurs montraient une réaction à risque. Ces résultats plaident pour la pose de balises sur les câbles conducteurs également.

Conformément aux recommandations émises dans diverses études, nous préconisons d'équiper au moins 60 % de la longueur au centre des portées où se concentre le plus grand risque (Liesenjohan *et al.* 2019, Eskom 2009). Les secteurs proches des pylônes présentent un risque de collision moindre.

Pour les lignes de moins de 30 m de haut, le constructeur conseille d'espacer les balises FireFly de 10 m et de les répartir sur tous les câbles en les disposant en alternance (APLIC 2012).

Effet des balises

L'installation des balises a entraîné une augmentation de la hauteur de vol d'approche et de la distance de réaction ainsi qu'une réduction des comportements à risque pour plusieurs groupes d'espèces, en particulier pour les anatidés. Les résultats suggèrent que les balises permettent une détection anticipée de l'obstacle et réduisent l'exposition au risque de collision.

Cet effet est particulièrement marqué chez les canards. Un vol rapide et peu manœuvrable, souvent en groupe, combiné à une mauvaise vision lointaine rend les espèces de ce groupe plus

vulnérables aux collisions. La pose des balises permet aux oiseaux d'adapter leur hauteur de vol et d'anticiper l'évitement de la ligne.

Les balises ont également réduit le risque de collision pour les grands anatidés (oies et cygnes), en particulier pour les oies cendrées qui se déplacent quotidiennement entre le lac et les champs pour rechercher leur nourriture. Le risque de collision pour les grands cormorans nichant à proximité immédiate de la ligne a également diminué.

Les observations réalisées au Fanel permettent de recommander l'installation de balises anticollisions sur les lignes électriques situées à proximité de sites de repos et d'hivernage d'anatidés et d'importantes colonies de reproduction (grand cormoran, cigogne blanche, héron cendré), ou traversant des couloirs de vol tels que les cours d'eau. Les lignes électriques potentiellement à risque situées dans les sites inscrits à l'inventaire OROEM (ordonnance sur les réserves d'oiseaux d'eau et de migrateurs d'importance internationale et nationale), les sites Ramsar (Convention sur les zones humides d'importance internationale), les biotopes d'importance nationale (en particulier les bas-marais et les zones alluviales) et les réserves naturelles abritant des milieux humides devraient être sécurisées en priorité.

6 Conclusion

L'étude du franchissement d'une ligne électrique HT traversant la réserve naturelle du Fanel a permis d'évaluer l'effet de balises anticollisions sur les comportements de l'avifaune. Elle a mis en évidence des changements comportementaux pour plusieurs groupes d'espèces, en particulier pour les anatidés, traduisant une meilleure détection des lignes rendues plus visibles. Une réduction du risque de collision est ainsi attendue.

L'effet des balises sur les petits passereaux et durant la nuit n'a pas été investigué, de même que l'effet sur la mortalité de l'avifaune. De telles analyses requièrent en effet des moyens humains et techniques conséquents dépassant le cadre de notre étude.

Les résultats de notre étude ont montré que les balises sont en mesure d'apporter une contribution significative à la conservation des oiseaux, en particulier pour les anatidés (oies, cygnes, canards, etc.). Sur cette base, l'installation de balises devrait être étudiée dans tous les sites humides abritant de grands rassemblements d'oiseaux nicheurs, migrateurs ou hivernants traversés par des lignes électriques potentiellement dangereuses pour l'avifaune.

Bibliographie consultée

- Alonso J.C., Alonso J.A., Mufioz-Pulido R. 1994. Mitigation of bird collisions with transmission lines through groundwire marking. *Biological Conservation* 67 : 129–134.
- [APLIC] Avian Power Line Interaction Committee. 2012. Reducing avian collisions with power lines: The state of the art in 2012. Edison Electric Institute and APLIC, Washington, DC, USA.
- Barrientos, R., J. C. Alonso, C. Ponce, and C. Palaćin. 2011. Meta-analysis of the effectiveness of marked wire in reducing avian collisions with power lines. *Conservation Biology* 25 : 893–903.
- Barrientos R, Ponce C, Palaćin C, Martin CA, Martin B, Alonso J.C. 2012. Wire marking results in a small but significant reduction in avian mortality at power lines: A BACI designed study. *PLoS ONE* 7(3) : e32569.
- Bernardino, J., K. Bevanger, R. Barrientos, J. F. Dwyer, A. T. Marques, R. C. Martins, J. M. Shaw, J. P. Silva, and F. Moreira. 2018. Bird collisions with power lines: State of the art and priority areas for research. *Biological Conservation* 222 : 1–13.
- Bernardino, J., R.C. Martins, R. Bispo, F. Moreira. 2019. Re-assessing the effectiveness of wire-marking to mitigate bird collisions with power lines : A meta-analysis and guidelines for field studies. *Journal of Environmental Management* 252, 109651
- Bernotat, D., Rogahn, S., Rickert, C., Follner, K. & Schönhofer, C. 2018. BfN-Arbeitshilfe zur arten- und gebietsschutzrechtlichen Prüfung bei Freileitungsvorhaben. Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.). BfN-Skripten 512, 200 S.
- Bernshausen F., Kreuziger J., Uther D., Wahl M. 2007. Hochspannungsfreileitungen und Vogelschutz: Minimierung des Kollisionsrisikos Bewertung und Maßnahmen zur Markierung kollisionsgefährlicher Leitungsbereiche. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 39 (1) : 5-12.
- Bernshausen F., Kreuziger J., Richarz K., Sudmann S.R. 2014. Wirksamkeit von Vogelabweisern an Hochspannungsfreileitungen Fallstudien und Implikationen zur Minimierung des Anflugrisikos. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 46 (4) : 107-115.
- Bevanger K. 1998. Biological and conservation aspects of bird mortality caused by electricity power lines: A review. *Biological Conservation* 86(1) : 67-76.
- Borner L. 2016. Apports méthodologiques à l'étude des interactions des oiseaux avec le réseau de transport d'électricité en France.
- Brown W.M & Drewien R.C. 1995. Evaluation of two power line markers to reduce crane and waterfowl collision mortality. *Wildlife Society Bulletin* 23 (2) : 217-227.
- Bruns, E. 2015. Auswirkungen zukünftiger Netzinfrastrukturen und Energiespeicher in Deutschland und Europa. Teilbericht 4: Vogelkollisionen an Freileitungen. Im Auftrag des BfN (Bundesamt für Naturschutz). Unter Mitarbeit von D. Kraetzschmer, J.C. Sicard und S. Garske.
- Probst R., Dorosencu A., Frank G. 2019. Danubeparks position paper: Electric power lines and bird conservation along the Danube river.
- Davis C. 1998. A review of the success of major crane conservation techniques. *Bird Conservation International* 8 : 19-29.
- Dwyer J.F., Pandey A.K., McHale L.A., Harness R.E. 2019. Near-ultraviolet light reduced Sandhill Crane collisions with a power line by 98%. *The Condor : Ornithological Applications* 121 : 1-10.
- Ecoconseil. 1994. Effets des lignes aériennes sur les oiseaux. Etude de la mortalité des oiseaux victimes de collisions avec des fils aériens. Suivi de la mortalité des oiseaux due à deux lignes électriques dans la région du Fanel. Rapport non publié.

Eskom. 2009. Transmission bird collision prevention guidelines. Johannesburg, South Africa. 10 pp.

Ferrer M. 2012. Birds and power lines. From conflict to solution. Endesa S.A. and Fundacion MIGRES. 187 p.

Ferrer M., Morandini V., Baumbusch R., Muriel R., De Lucas M., Calabuig C. 2020. Efficacy of different types of "bird flight diverter" in reducing bird mortality due to collision with transmission power lines. *Global Ecology and Conservation* 23. e01130.

FNN-VDE. 2014. Vogelschutzmarkierung an Hoch- und Höchstspannungsfreileitungen. FNN-Hinweis.

Frost D. 2008. The use of 'flight diverters' reduces mute swan *Cygnus olor* collision with power lines at Abberton Reservoir, Essex, England. *Conservation Evidence* 5 : 83-91.

Heck N.S., James F. Dwyer, Richard E. Harness, Melissa A. Landon, and Lori A. Nielsen. 2016. Quantifying and mitigating avian collisions with transmission lines in Pincher Creek, Alberta, Canada. *Environmental Concerns in Rights-of-Way Management, 11th International Symposium*.

Jenkins A., Smallie J.J., Diamond M. 2010. Avian collisions with power lines: a global review of causes and mitigation with a South African perspective. *Bird Conservation International* September 2010 : 1-16.

Jödicke K., Lemke H., Mercker M. 2018. Wirksamkeit von Vogelschutzmarkierungen an Erdseilen von Höchstspannungsfreileitungen. Ermittlung von artspezifischen Kollisionsraten und Reduktionswerten in Schleswig-Holstein. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 50 (8) : 286-294.

Jones M.P., Pierce K.E. Jr., Ward D. 2007. Avian vision : a review of form and function with special consideration to birds of prey. *J. Exot. Pet Med.* 2 : 69–87.

Koops, F. B. J. 1997. Markierung von Hochspannungsfreileitungen in den Niederlanden. In: *Vogel und Umwelt. Zeitschrift für Vögelkunde und Naturschutz in Hessen* 9 (Sonderheft Vögel und Freileitungen), S. 276-278.

L'Azuré. 2021. Ligne électrique HT 60 kV Cudrefin-Thielle, réserve du Fanel. Suivi de l'effet des balises anticollisions sur l'avifaune : état initial. Synthèse du rapport de stage d'Astrance Fenestraz.

Lemarié C. 2017. Evaluer de manière automatisée l'efficacité des balises avifaune et comparer leur performance. Initiation d'un projet de recherche. Mémoire de Fin d'Etudes. Ecole Supérieure d'Agriculture d'Angers 61 p.

Liesenjohann M., Blew J., Fronczek S., Reichenbach M. & Bernotat D. 2019. Artspezifische Wirksamkeiten von Vogelschutzmarkern an Freileitungen. *Methodische Grundlagen zur Einstufung der Minderungswirkung durch Vogelschutzmarker – ein Fachkonventionsvorschlag. Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.). BfN-Skripten* 537 : 286 S.

Liesenjohann M., Blew J., Fronczek S., Reichenbach M. & Bernotat D. 2020. Wirksamkeit von Vogelschutzmarkern. Ein Fachkonventionsvorschlag zur Minderungswirkung an Freileitungen. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 52 : 184-190.

Martin G.R., J.M. Shaw. 2010. Bird collisions with power lines: Failing to see the way ahead? *Biol. Conserv.* 143 : 2695–2702.

Murphy, R. K., S.M. McPherron, G.D. Wright, K.L. Serbousek. 2009. Effectiveness of avian collision averters in preventing migratory bird mortality from powerlines stricken in the Central Platte River, Nebraska. 2008 - 2009 Final Report.

Murphy, R. K., J. F. Dwyer, E. K. Mojica, M. M. McPherron, and R. E. Harness. 2016. Reactions of Sandhill Cranes approaching a marked transmission power line. *Journal of Fish and Wildlife Management* 7 : 480–489.

Murphy, R. K., E. K. Mojica, J. F. Dwyer, M. M. McPherron, G. D. Wright, R. E. Harness, A. K. Pandey, and K. L. Serbousek. 2016. Crippling and nocturnal biases in a study of Sandhill Crane (*Grus canadensis*) collisions with a transmission line. *Waterbirds* 39 : 312–317.

Pandely, A., R. Harness, M. K. Schriener. 2004 et 2008. Bird Strike Indicator/Bird Activity Monitor and field assessment of avian fatalities, phase 1 and 2. California Energy Commission

Savereno, A.J., L.A. Savereno, R Boettcher, S.M. Haig. 1996. Avian behaviour at power lines in coastal South Carolina. *Wildl. Soc. Bull.* 24 : 636–648.

Sporer, M. K., J. F. Dwyer, B. D. Gerber, R. E. Harness, and A. K. Pandey. 2013. Marking power lines to reduce avian collisions near the Audubon National Wildlife Refuge, North Dakota. *Wildlife Society Bulletin* 37 : 796–804.

Ventana Wildlife Society. 2009. Evaluating diverter effectiveness in reducing avian collisions with distribution lines at San Luis National Wildlife refuge complex, Merced County, California. California Energy Commission, Public Interest Energy Research (PIER) Program. CEC-500-2009-078.

Yee M.L. 2007. Testing the effectiveness of an avian flight diverter for reducing avian collisions with distribution power lines in the Sacramento Valley, California. California Energy Commission, PIER Energy-Related Environmental Research Program.

Annexes

1. Méthode d'analyse

Les analyses ont été réalisées pour l'ensemble des espèces, puis pour 3 espèces ou groupes d'espèces considérées comme vulnérables aux collisions sur la base de leurs caractéristiques morphologiques et comportementales :

Groupe	Caractéristiques morphologiques et comportementales *
Ensemble des espèces (principalement influencé par les grands cormorans)	Grand cormoran : - peu manœuvrable - colonie nichant à proximité de la ligne
Courlis cendré	- peu manœuvrable - faible vision binoculaire, voire angle mort avant - vol en groupe
Grands anatidés	- peu manœuvrable - faible vision binoculaire - vol en groupe
Petits anatidés	- peu manœuvrable - myope en l'air - vol très rapide et en groupe

* caractéristiques plus ou moins marquées selon les espèces du groupe

L'analyse des données a été réalisée en deux temps selon la méthodologie suivante :

- 1) Calcul de la proportion d'individus par catégorie pour chaque facteur, avant et après la pose des balises :

Facteur	Catégories
Type de réaction	- Aucune - Anticipée - Soudaine
Hauteur d'approche (30 m avant la ligne) et de franchissement	1 à 5
Distance de réaction soudaine	- < 20 m - 20-30 m - 31-50 m

L'observation des différences de proportions avant et après la pose des balises permet de repérer les catégories avec une taille d'effet pertinente, pour chaque facteur.

- 2) 1'000 *bootstrap* avec calcul de l'intervalle de confiance à 95 % pour vérifier la significativité de la différence dans les catégories avec une taille d'effet pertinente.

En assumant qu'un échantillon est représentatif de la distribution réelle d'un facteur (donc assez grand), la méthode dites de *bootstrap* permet d'évaluer la variation au sein d'un jeu de données unique. A cet effet, l'échantillon est simulé 1'000 fois dans un premier temps, par ré-échantillonnage aléatoire du jeu de donnée. La moyenne et l'intervalle de confiance sont ensuite calculés pour les 1'000 échantillons simulés.

Cette analyse a été appliquée séparément aux observations faites avant et après la pose des balises, afin de pouvoir comparer les intervalles de confiance à 95 %. La différence est pertinente si les intervalles de confiance ne se croisent pas. L'analyse a également permis une seconde vérification de l'effet de la différence, en calculant la moyenne et l'écart-type entre les deux situations. Si la moyenne de la différence moins l'écart-type est plus élevée que 5 %, l'effet est alors considéré comme significatif.

Toutes les analyses ont été faites avec le logiciel R 4.0.3 (R Core Team 2020).

2. Analyses détaillées

Ensemble des espèces

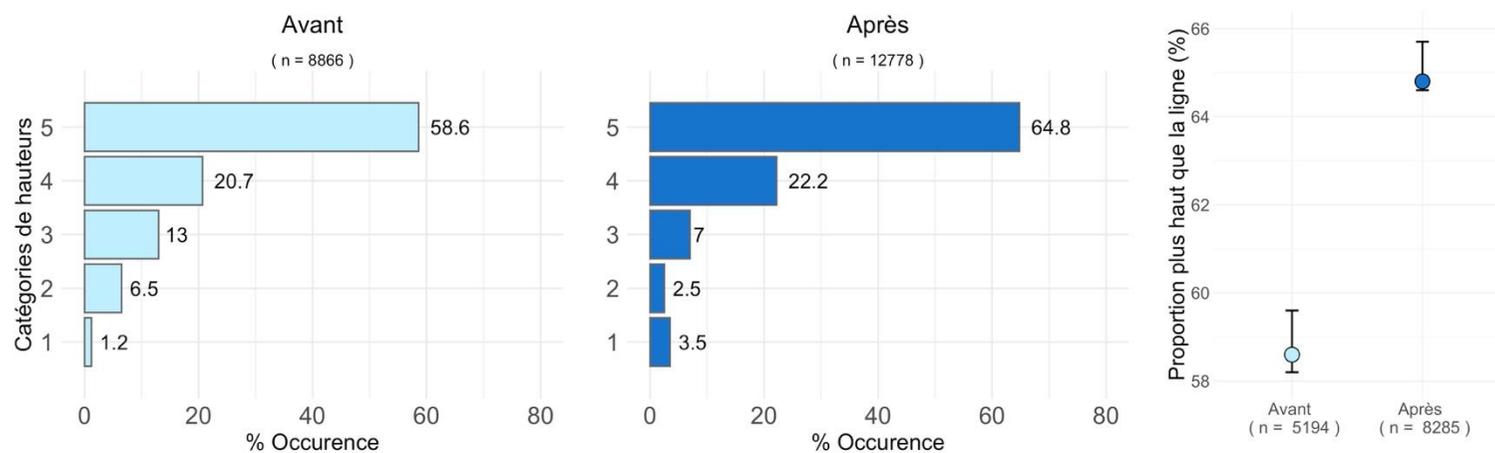


Figure 7 : Hauteur d'approche à 30 m de la ligne avant et après la pose des balises (proportions absolues du nombre d'occurrences) ; graphe de droite : proportions moyennes (après 1'000 simulations de l'échantillon) d'oiseaux volant plus haut que la ligne (catégorie H5 ; intervalles de confiance à 95%), augmentation de $6,3 \pm 0,7$ % (moyenne \pm écart type) après la pose des balises

Suivi de l'effet des balises anticollisions sur l'avifaune

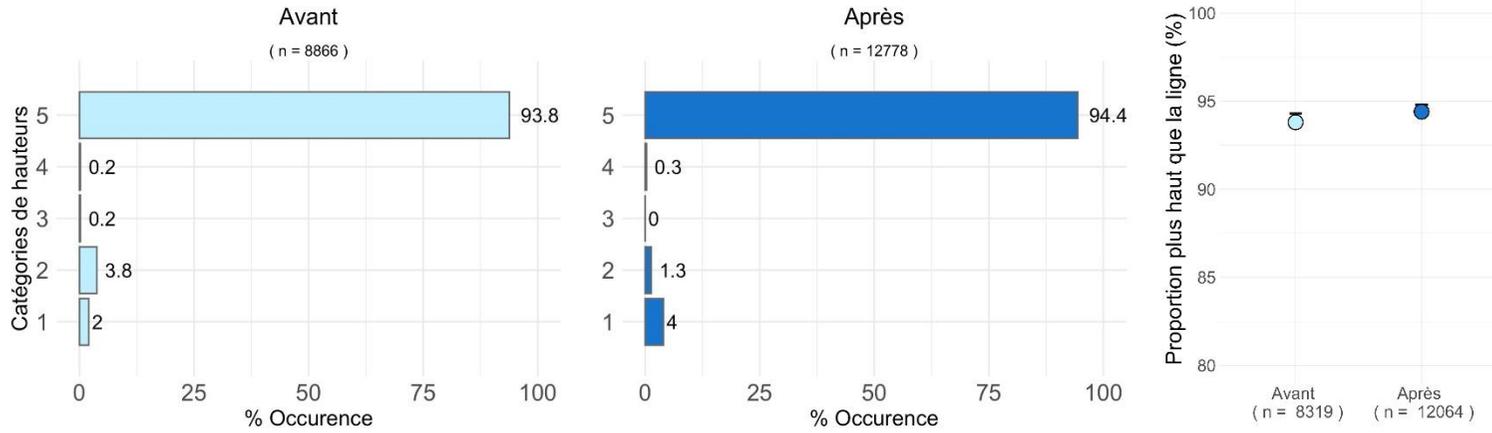


Figure 8 : Hauteur de vol lors du franchissement de la ligne avant et après la pose des balises ; graphe de droite : proportions moyennes d'oiseaux volant plus haut que la ligne ; pas de différence significative

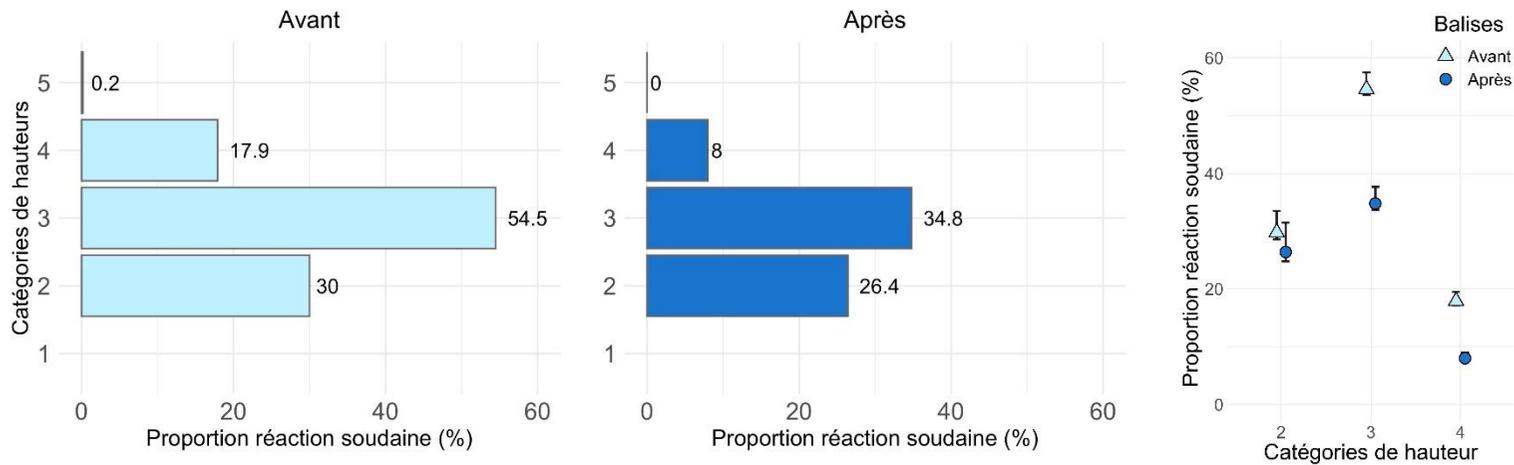


Figure 9 : Taux de réaction soudaine par catégorie de hauteur d'approche (-30 m) avant et après la pose des balises ; graphe de droite : les différences pour les catégories H3 et H4 sont significatives

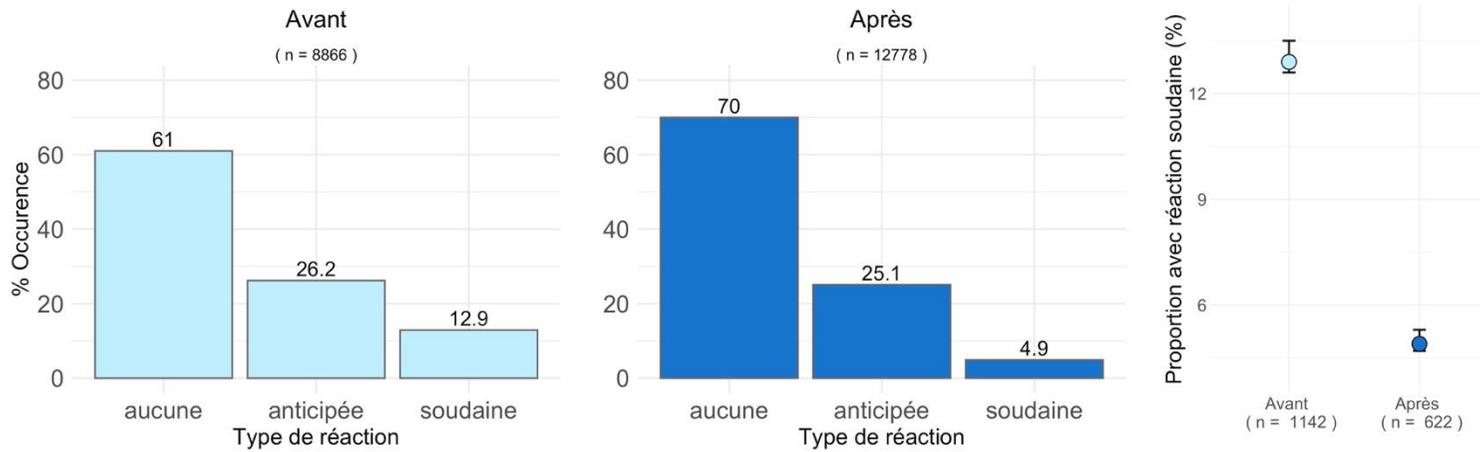


Figure 10 : Type de réaction face à la ligne, avant et après la pose des balises ; graphe de droite : proportions moyennes d'oiseaux ayant une réaction soudaine ; la proportion d'oiseaux montrant une réaction soudaine est réduite de $8 \pm 0,4$ % après la pose des balises

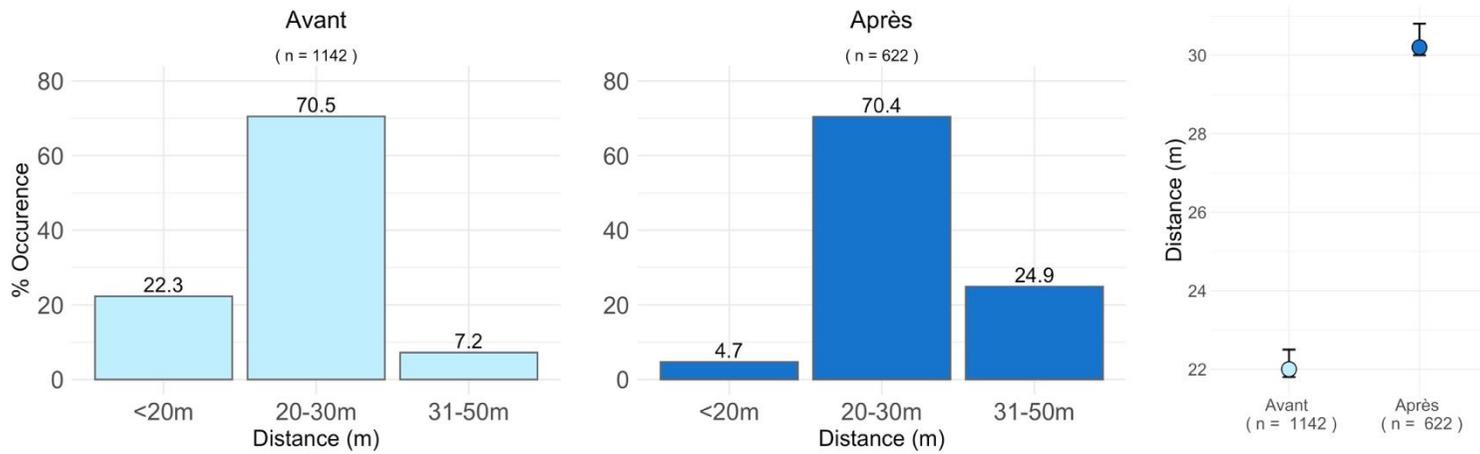


Figure 11 : Distances de réaction soudaine face à la ligne, avant et après la pose des balises ; augmentation de $17,8 \pm 1,9$ % des oiseaux réagissant à plus de 30 m de la ligne ; graphe de droite : augmentation de la distance moyenne de réaction de $8,2 \pm 0,4$ m

Grands anatidés

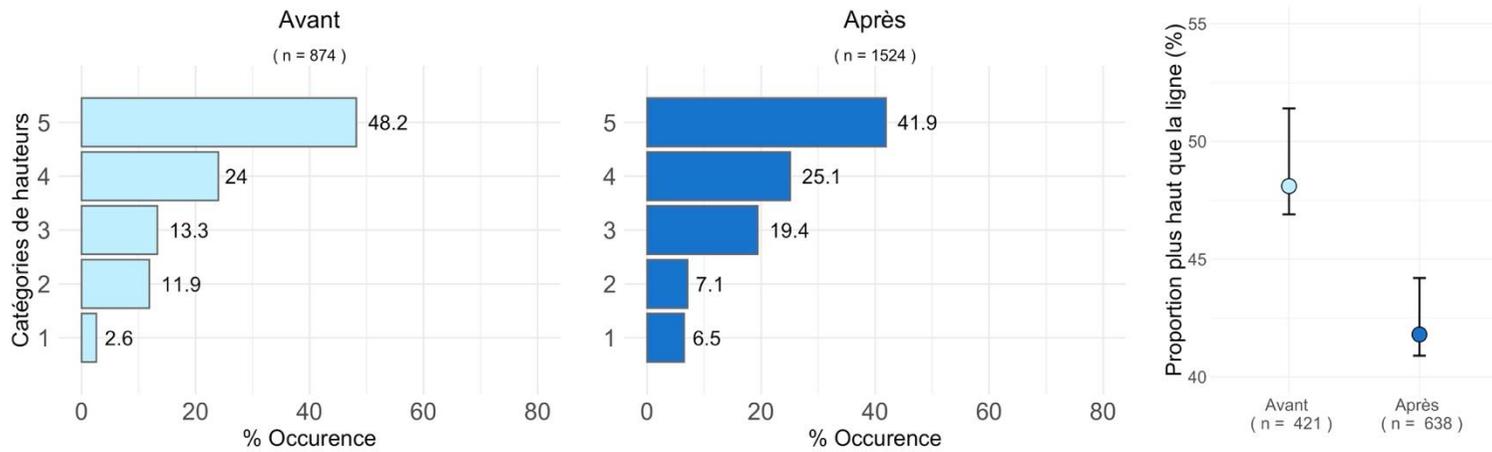


Figure 12 : Hauteur d'approche à 30 m de la ligne avant et après la pose des balises ; graphe de droite : proportions moyennes d'oiseaux volant plus haut que la ligne (catégorie H5), différence non significative de $6,4 \pm 2,1$

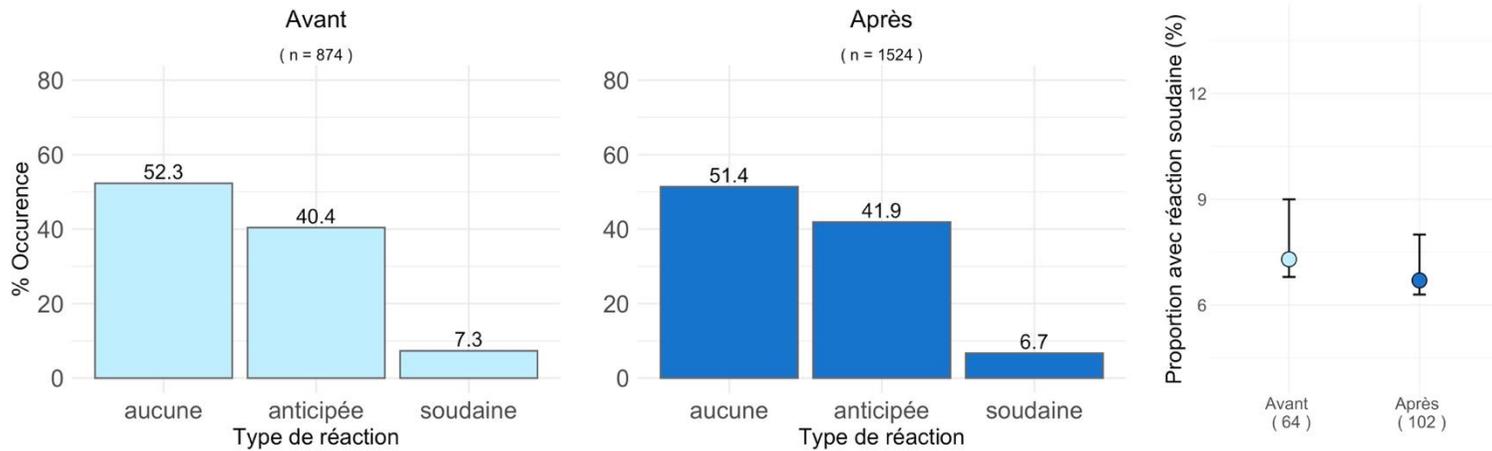


Figure 13 : Type de réaction face à la ligne, avant et après la pose des balises ; graphe de droite : proportions moyennes d'oiseaux ayant une réaction soudaine ; différence non significative

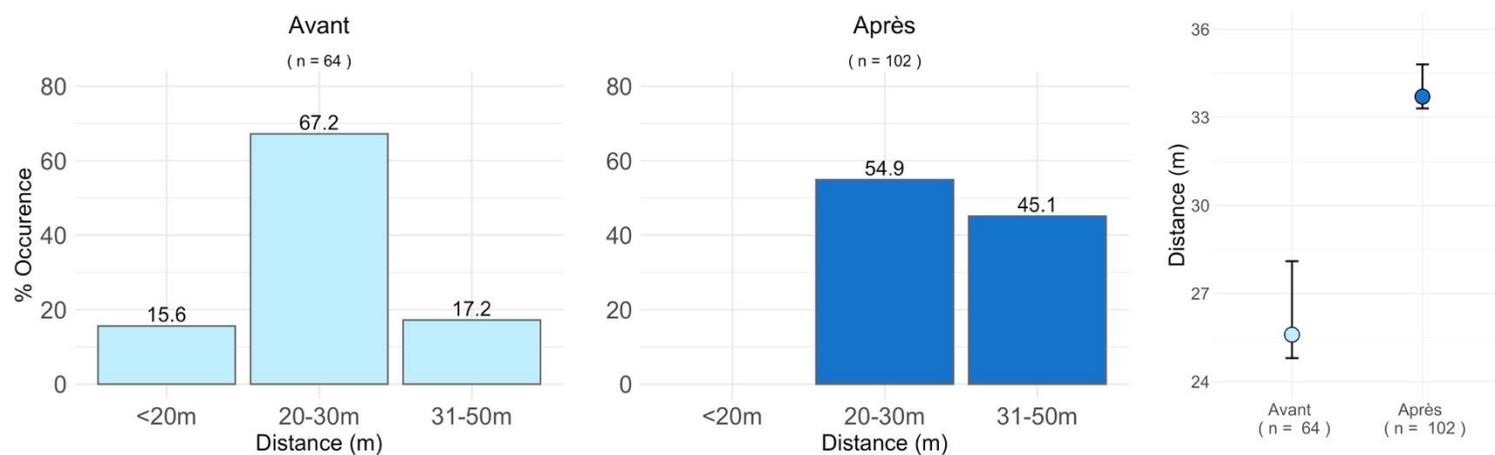


Figure 14 : Distance de réaction soudaine face à la ligne, avant et après la pose des balises ; augmentation de 28,3 ± 6,7 % des oiseaux réagissant à plus de 30 m de la ligne ; graphe de droite : augmentation de la distance moyenne de réaction de 8,1 ± 1,4 m

Petits anatisés

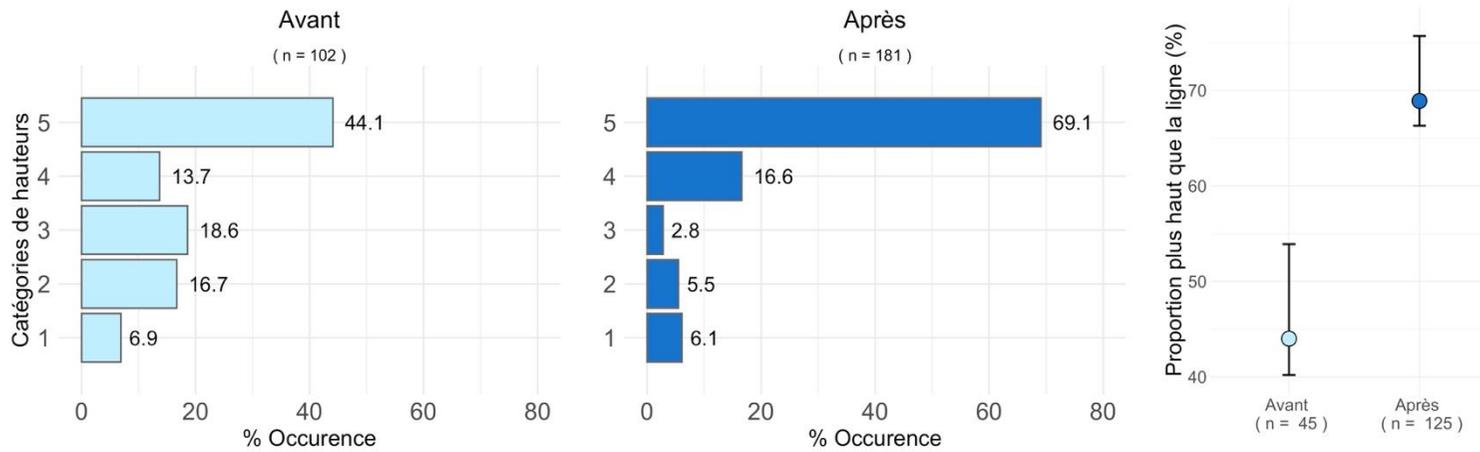


Figure 15 : Hauteur d'approche à 30 m de la ligne avant et après la pose des balises ; graphe de droite : proportions moyennes d'oiseaux volant plus haut que la ligne (catégorie H5), augmentation de 25 ± 6,3 % après la pose des balises

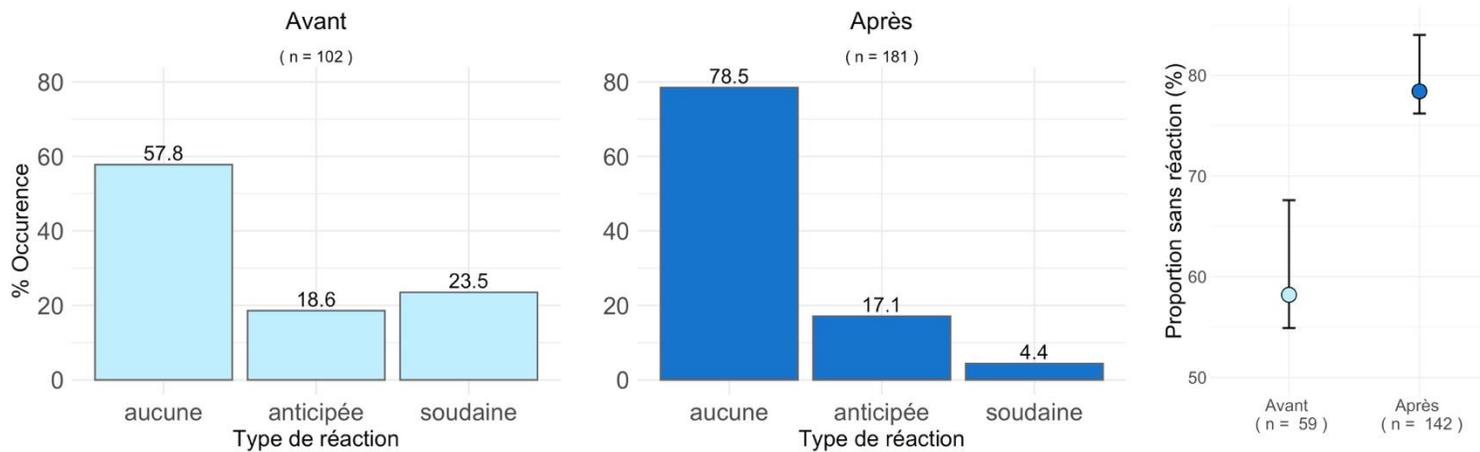


Figure 16 : Type de réaction face à la ligne, avant et après la pose des balises ; graphe de droite : proportions moyennes d'oiseaux ne montrant aucune réaction, augmentation de 20,2 ± 5,5 % après la pose des balises

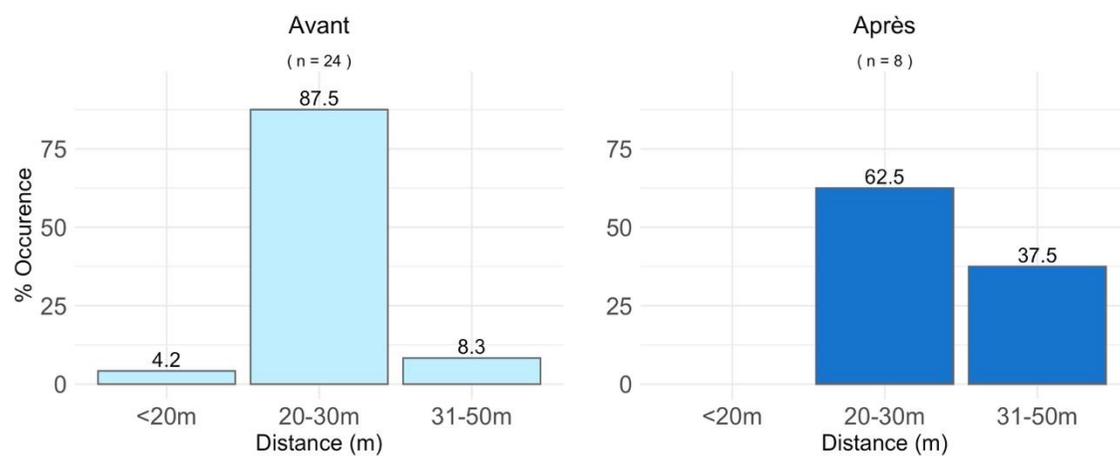


Figure 17 : Distances de réaction soudaine face à la ligne, avant et après la pose des balises ; le nombre d'individus avec réaction soudaine en 2021 est trop faible pour une vérification statistique, mais une tendance à l'augmentation de la distance semble perceptible

Tronçon de portée traversé

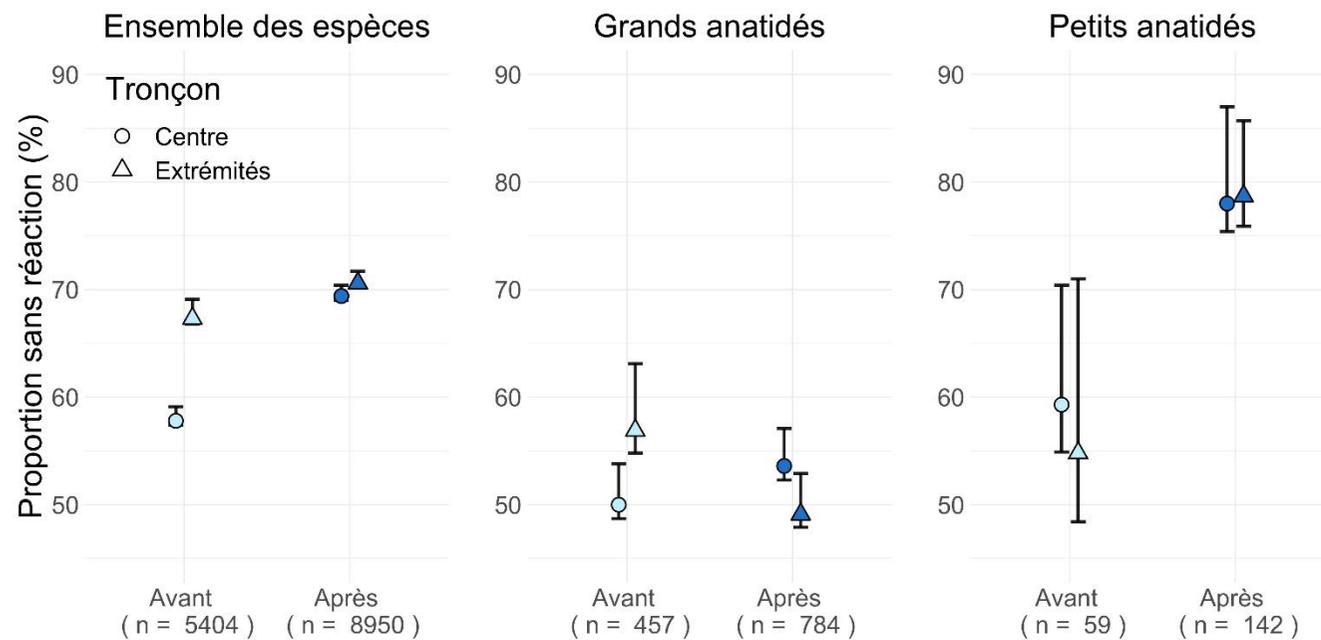


Figure 18 : Proportions moyennes d'oiseaux sans réaction face à la ligne, selon le tronçon de portée traversé (extrémités ou centre) avant et après la pose des balises, pour l'ensemble des espèces, les grands et les petits anatidés ; pour l'ensemble des espèces et avant la pose des balises, $9,4 \pm 1,1$ % d'individus supplémentaires ne montrent pas de réaction en traversant la ligne aux extrémités plutôt qu'au centre ; après la pose des balises, la différence s'estompe et passe à $1,3 \pm 0,8$ %

Visibilité de la ligne

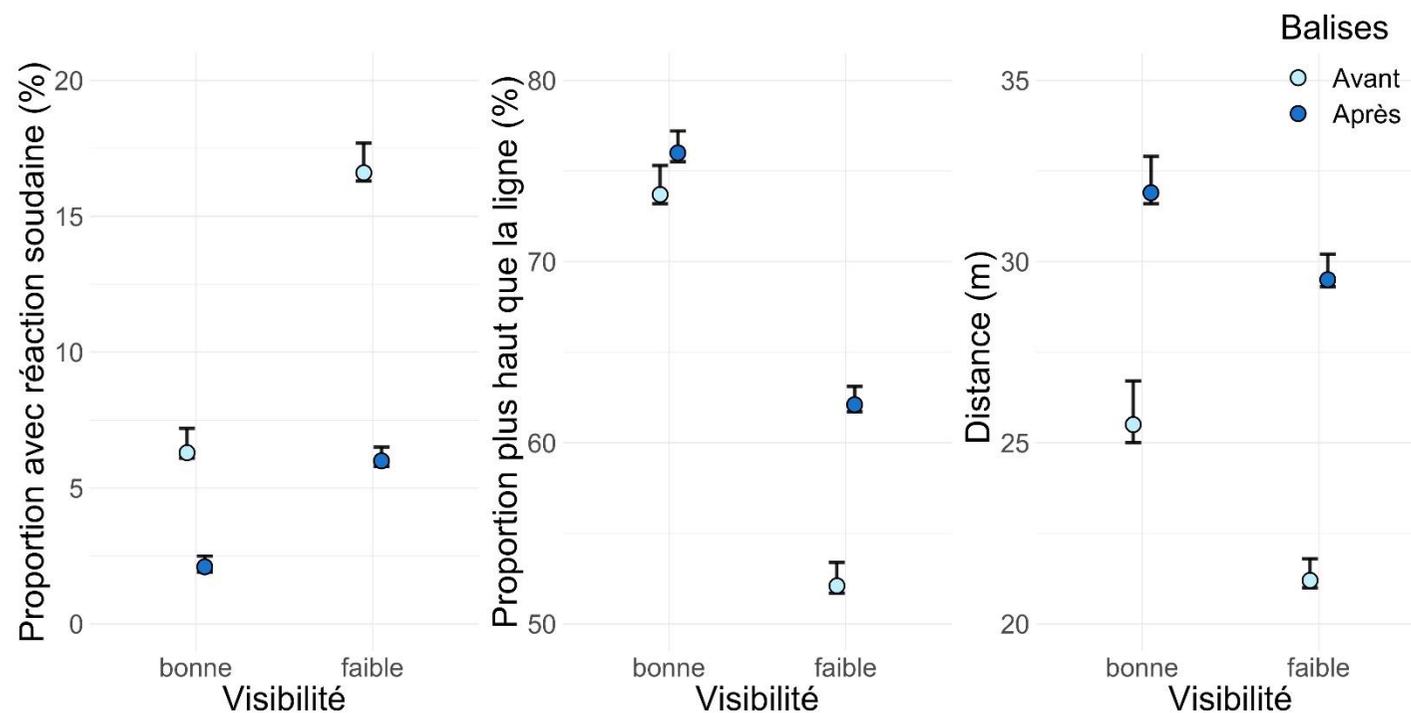


Figure 19 : Comparaison des comportements en fonction de la visibilité de la ligne, avant et après la pose des balises, pour l'ensemble des espèces ; la visibilité a été considérée comme faible à l'aube jusqu'à 15 minutes après l'heure du lever du soleil et bonne par la suite