

Programme de recherche
« Réduction de la Mortalité Aviaire
dans les Parcs Éoliens en Exploitation »

Protocole d'évaluation des performances des systèmes de détection-réaction ;

Protocole « parc »

Dupont Sophie M., Corbeau Alexandre, Ballester Cyrielle, Duriez
Olivier & Besnard Aurélien

Centre d'Écologie Fonctionnelle et Evolutive, Univ Montpellier, CNRS UMR5175, EPHE-PSL University, IRD,
Montpellier, France — équipe de recherche du projet MAPE (Mortalité Aviaire dans les Parcs Éoliens terrestres
en exploitations)

Citation préconisée : Dupont S. M., Corbeau A., Ballester C., Duriez O. & Besnard A. (2023) – Protocole
d'évaluation des systèmes de détection-réaction, protocole « parcs ». 33 pages.

Version 1.0, dernière mise à jour le 10/05/2023.

Table des matières

ABREVIATIONS	3
INTRODUCTION	4
1. LES PARAMETRES A ESTIMER.....	6
1.1. Probabilité que le système soit fonctionnel.....	6
1.2. Probabilité de détection/classification.....	8
1.2.1. Le paramètre à estimer : La probabilité de détection/classification combinée avant une certaine distance	8
1.2.2. Le choix des moyens-tiers pour estimer ce paramètre.....	10
1.3. Probabilité de réaction du SCADA.....	18
2. ACQUISITION DES DONNEES SUR LE TERRAIN	20
2.1. Réglages du SDA et période d'étude.....	20
2.2. Acquisition des données des cibles via un moyen-tiers	20
2.2.1. Utilisation d'individus sauvages équipés de balises GPS	20
2.2.2. Utilisation d'observateurs humains équipée d'un télémètre laser	21
3. TRAITEMENT ET MODELISATION STATISTIQUE DES DONNEES ACQUISES SUR LE TERRAIN	26
4. TAILLES D'ECHANTILLON ET PRECISION DES ESTIMATIONS.....	29
REFERENCES	31
ANNEXE 1 - INTERVALLES DE CONFIANCE A 95% OBTENUS EN FONCTION DU NOMBRE DE TRAJECTOIRES UTILISE ET DE LA PROBABILITE DE DETECTION DU SDA.....	32

Abréviations

- . Degré Celsius : °C
- . Degré d'angle : °
- . Heure : h
- . Kilomètre : km
- . Litre : L
- . Lux : lx
- . Mètre : m
- . Mil angulaire : mil
- . Millimètre : mm
- . Minute : min
- . Système de detection-réaction : SDA
- . Seconde : s
- . Watt : W
- . Work Package : WP

Introduction

Ce document a été rédigé dans le cadre du programme de recherche collaboratif MAPE (<https://mape.cnrs.fr/fr>, « Réduction des Mortalités Aviaires dans les Parcs Éoliens terrestres en Exploitation »). Il résulte du travail réalisé dans le cadre du WP4 dont l'objectif était de rédiger un protocole d'évaluation des performances des systèmes de détection-réaction installés dans les parcs éoliens terrestres pour réduire les collisions d'oiseaux.

Dans ce cadre, deux protocoles ont été élaborés afin d'évaluer les **performances** des systèmes de détection-réaction (désignés par l'abréviation **SDA** dans la suite du document). Ces protocoles n'ont pas vocation à évaluer l'**efficacité** (définie comme la capacité de réduction des mortalités) des SDA (voir la justification de ce choix dans Corbeau et Besnard, 2021). Ils n'ont pas non plus vocation à identifier les sources de pannes ou les divers problèmes de réglage des SDA. Ce choix de la question scientifique à traiter dans les protocoles MAPE a été fait au cours des premiers séminaires dédiés au projet, séminaires rassemblant l'ensemble des parties prenantes impliquées dans la conciliation du développement de l'éolien en France et de la préservation de la Biodiversité. Ces protocoles ont par la suite été co-construits avec l'ensemble des membres du comité technique du Work Package 4 (WP4) de ce programme de recherche. Ce comité technique inclut, là aussi, des membres de toutes les parties prenantes impliquées dans les questions du développement de l'éolien en France et de la préservation de la biodiversité : les opérateurs de parcs éoliens, les bureaux d'études, les associations de protection de la nature, les DREALs, l'OFB et des institutions de recherche. Les fournisseurs de SDA ont volontairement été écartés de ce comité technique pour ne pas générer de conflit d'intérêt. Cependant, ils ont tous été consultés afin d'obtenir des informations précises sur le fonctionnement et les caractéristiques technologiques des dispositifs qu'ils déploient actuellement sur le territoire français.

Ce document fait suite à la rédaction, dans le cadre de la première année de MAPE, d'une note de synthèse concernant l'évaluation des SDA, diffusée en août 2021 (Corbeau et Besnard, 2021) intitulée « *Les systèmes de détection-réaction dans les parcs éoliens, un moyen de réduction des mortalités aviaires : Principes et conseils pour une bonne évaluation* ». Cette note est téléchargeable sur le site internet du programme MAPE (<https://mape.cnrs.fr/wp-content/uploads/2021/12/Corbeau-Besnard-MAPE-2021-Principes-et-conseils-pour-une-bonne-evaluation-des-sytemes-de-detection-reaction.pdf>). Les protocoles rédigés par la suite dans le cadre du WP4 de MAPE découlent de fait directement des recommandations émises dans cette note de synthèse.

L'objectif des deux protocoles rédigés dans le cadre de MAPE est d'obtenir une évaluation standardisée, homogène et neutre des performances des SDA déployés sur les parcs pour réduire les mortalités d'oiseaux par collision. Ils se veulent applicables à tous les dispositifs actuellement déployés sur le territoire français (à la date de publication de ce document, deuxième trimestre 2023), indépendamment de la technologie employée, mais aussi aux systèmes qui seront développés et mis sur le marché dans le futur. A noter que ces protocoles visent à une évaluation diurne des systèmes. En effet, à l'heure actuelle, il n'existe pas d'approche expérimentale robuste permettant de mesurer les performances nocturnes de ces dispositifs, notamment du fait de l'absence de moyen-tiers pertinent la nuit (voir partie 1.2.2. pour le choix des moyens-tiers retenus dans le cadre des protocoles développés par l'équipe scientifique de MAPE).

L'évaluation des performances des SDA peut avoir deux objectifs sensiblement différents (i) porter à connaissance ces performances génériques pour que les opérateurs éoliens puissent les comparer et choisir le dispositif le plus adapté à leur parc, (ii) évaluer si ces performances respectent les obligations réglementaires en vigueur dans un parc donné. De ce fait, il a été décidé d'élaborer deux protocoles distincts et complémentaires : un protocole « fournisseur » à destination des entreprises fournisseurs de systèmes, qui répond à l'objectif de porter à connaissance les performances génériques des systèmes en testant leurs performances dans des situations variées ; et le protocole « parc » à destination des exploitants de parcs éoliens permettant de tester un SDA sur un parc donné afin de vérifier que ses performances correspondent bien aux obligations réglementaires. Dans le présent document, seul le protocole « parc » est présenté. Le protocole « fournisseur » fait l'objet d'un document séparé, disponible, lui aussi, sur le site web de MAPE.

Le protocole « parc » a pour objectif de vérifier que le SDA installé sur un parc donné est performant pour réduire les mortalités aviaires selon les exigences réglementaires qui s'y appliquent. Il s'agit de ce fait de vérifier, en conditions réelles, sur le parc d'intérêt, que le système permet de déclencher une réaction adaptée au niveau des zones considérées comme à risque – c'est-à-dire à proximité des éoliennes – afin de limiter les collisions d'espèces à risque/protégées.

L'évaluation des performances, telle que définie dans le cadre de ce protocole, passe par une appréciation des quatre phases d'opérationnalité des SDA : le fonctionnement du système, la détection des cibles, leur classification et la réaction du système et de l'éolienne (Corbeau et Besnard, 2021). Il est primordial que chaque étape soit évaluée car c'est leur enchaînement qui conditionne la performance globale du système. En effet, si une étape présente de faibles performances (indépendamment des autres), alors la performance générale du dispositif sera limitée par ce maillon faible. Ainsi, la réalisation de cette évaluation repose sur l'estimation de paramètres propres à chacune de ces quatre étapes.

A noter que l'évaluation des performances des étapes de détection et de classification seront réalisées uniquement au vu des spécificités précisées dans les arrêtés préfectoraux en vigueur dans le parc en question, c'est-à-dire pour les espèces cibles et pour les classes de distance de détection précisées dans cet arrêté le cas échéant.

Dans l'éventualité où un système installé ne répondrait pas aux attentes de l'arrêté préfectoral, le protocole mis en place ici ne permettra pas d'identifier les causes de ce manquement de conformité (ce point n'étant pas l'objectif du protocole). Le fournisseur du SDA devra conduire son propre diagnostic pour améliorer les performances du dispositif installé sur le parc en question. A noter enfin que, dans ce protocole, seul l'arrêt machine sera considéré en termes de réaction mise en place par l'éolienne comme mesure de réduction des mortalités aviaires (les effarouchements sonores et visuels sont exclus de ce protocole).

Le protocole « parc » repose sur l'estimation de trois paramètres complémentaires : la probabilité que le système soit fonctionnel ; la probabilité de détection/classification combinée sachant la distance-seuil considérée comme à risque et sachant les espèces cibles de l'arrêté ; et la probabilité de réaction de l'éolienne. C'est la multiplication de ces trois probabilités qui permet d'estimer la performance générale du SDA et de fait, de déterminer si ce dispositif respecte l'arrêté préfectoral ou non. Cette probabilité globale sera notée **performance globale** dans la suite de ce document.

1. Les paramètres à estimer

1.1. Probabilité que le système soit fonctionnel

La couverture spatiale du SDA est un élément descriptif important pour caractériser ses performances. Le protocole « parc » ne s'attache cependant pas à l'examiner en détail. En effet, ce protocole a pour vocation d'estimer la performance globale du système pour vérifier son adéquation avec l'arrêté préfectoral en vigueur. Il n'est donc pas nécessaire de déterminer s'il y a (et la localisation) des angles morts. Dans le cas d'une performance globale plus faible qu'attendue, il pourra être utile que le fournisseur examine *a posteriori* l'existence éventuelle de tels angles morts pour apporter des corrections au système déployé. A noter que c'est en général une étape conduite par le fournisseur lors de l'installation du SDA sur un parc éolien. L'analyse fine

des données collectées sur le parc lors de la conduite du protocole pourra cependant donner des indications sur l'existence de tels angles morts.

La couverture temporelle se définit comme le pourcentage de temps durant lequel le SDA est opérationnel à l'échelle de la journée. La réalisation des semaines de terrain programmées aléatoirement au cours de l'année pourrait permettre d'estimer directement la performance globale du dispositif installé, performance incluant de fait les éventuelles pannes complètes du système. Cependant, ces interruptions de fonctionnement étant probablement ponctuelles, estimer ce paramètre en se reposant uniquement sur ces visites de terrain risque de conduire à de fortes sous-estimations ou sur-estimations de cette probabilité sauf si des efforts de terrain considérables sont déployés. En effet, si, par malchance, une semaine de terrain est réalisée lorsque le SDA est en panne alors qu'il est opérationnel quasiment tout le reste de l'année, la performance globale du dispositif obtenue sera dans ce cas fortement sous-estimée. Au contraire, le système peut être en panne pendant plusieurs jours sans qu'il n'y ait aucun jour de terrain sur cette période. La performance globale obtenue sur le terrain sera alors surestimée. Pour minimiser ces risques de biais, le protocole proposé ici s'attache à conduire les tests de terrain uniquement lorsque le système est opérationnel. Ceci peut être vérifié en contactant l'entreprise fournisseur et/ou l'opérateur ; ou en se connectant à l'interface de contrôle du dispositif, la veille de chaque semaine de terrain par exemple (selon les modalités convenues avec l'opérateur et/ou le fournisseur, voir le « Guide d'accompagnement au déploiement des protocoles d'évaluation des performances des systèmes de détection-réaction »). Il est important de souligner qu'au vu des éléments détaillés précédemment, conduire les tests de terrain dans ces conditions ne permet pas d'estimer directement la performance globale puis qu'il sur-estime cette performance en excluant les jours où le système n'est pas opérationnel. Les performances ainsi mesurées (correspondant au point 2 ci-dessous : probabilité de détection/classification) doivent donc être complétées par une mesure de la fréquence de panne complète du système afin d'estimer la performance globale.

Pour cela, les données enregistrées par le SDA sur plusieurs mois seront récupérées. Elles seront examinées afin de relever les jours durant lesquels le système ne présente aucune détection/classification/réaction. Ces données permettront d'estimer la probabilité journalière moyenne de fonctionnement du système (ainsi que l'intervalle de confiance associé). La sélection d'un grand nombre de jours permet d'obtenir aisément une estimation précise de ce paramètre.

A noter que les pannes partielles du système (une caméra hors service par exemple) ne peuvent pas être détectées en amont de la réalisation des jours de terrain. Elles ne sont pas non plus détectées *a posteriori* via les données collectées par le SDA puisque des détections/réactions auront lieu du fait de leur déclenchement par les autres caméras par exemple. De ce fait, ces défauts techniques seront intégrés dans la probabilité

moyenne de détection/classification du système (voir ci-dessous) et seront donc bien pris en compte dans l'estimation de la performance globale.

1.2. Probabilité de détection/classification

1.2.1. Le paramètre à estimer : La probabilité de détection/classification combinée avant une certaine distance

Schématiquement, les risques de collision surviennent lorsque des oiseaux passent dans l'environnement proche des éoliennes. Les oiseaux se déplacent en trois dimensions (longitude, latitude, altitude) à proximité des turbines et leurs trajectoires peuvent, à un moment donné, intersecter la zone de rotation des pâles. Les SDA ont alors pour objectif de détecter les individus en vol ; de classer, à la fois l'oiseau (souvent selon sa taille sans nécessairement classer la cible à l'espèce) et sa trajectoire, comme étant « à risque » ou pas et de mettre en place une réaction appropriée (effarouchement sonore ou visuel ou arrêt de la turbine), le cas échéant. Pour évaluer les performances des SDA sur un parc donné, il convient, de fait, d'estimer les probabilités de détection et de classification de l'espèce concernée par l'arrêté préfectoral (ou des espèces s'il y en a plusieurs).

Il semble cependant difficile d'estimer séparément les probabilités de détection et de classification pour tous les systèmes déployés en France aujourd'hui. En effet, la majorité des systèmes actuellement développés recherche constamment les objets volants ou les variations de pixel dans les images acquises (étape de détection d'objets potentiellement pertinents). Ces systèmes détectent en continu des objets, qui sont « classés » en continu également. Cette évaluation de la nature des cibles détectées (étape de classification) se réalise de façon quasi-instantanée (avec des vitesses de calcul souvent très importantes), afin de les exclure immédiatement (dans la majorité des cas) ou au contraire de poursuivre vers une qualification plus précise du risque. Dans ce contexte, il paraît donc complexe de séparer les processus de détection et de classification. Par ailleurs, les données sauvegardées par les SDA ne concernent, en général, que les événements détectés et classifiés comme pertinents (ayant induit une réaction ou non, *informations fournies par les fournisseurs*). Ceci rend, de fait, impossible la séparation de ces deux étapes à partir des données enregistrées par défaut. Les fournisseurs nous ont bien précisé qu'il est, en théorie, possible de conserver des informations pour tous les événements détectés (classifiés ou non ; ayant induit une réaction ou non). Néanmoins, leur extraction

représente un travail conséquent et nécessite une capacité de stockage très importante (certains fournisseurs ont comptabilisé plusieurs dizaines de milliers d'évènements détectés sur une journée). Le traitement de telles données implique aussi un temps d'analyse considérable puisqu'il faudrait repasser « manuellement » sur l'ensemble de ces détections pour déterminer si la classification a été pertinente. Par ailleurs, les fournisseurs considèrent que l'évaluation séparée des probabilités de détection et de classification n'apporte pas d'élément particulièrement pertinent à l'utilisateur potentiel de ces systèmes puisque c'est bien le résultat des deux étapes qu'il est nécessaire d'évaluer pour savoir si le système prend les bonnes décisions de déclenchement d'une réaction. Du fait de ces éléments, **le protocole « parc » se focalise sur la probabilité de détection/classification combinée des SDA.**

A partir de la trajectoire d'un oiseau, plusieurs variables d'intérêt associées aux performances des systèmes ont été utilisées dans la littérature scientifique ou dans les retours d'expérience antérieurs de tests de performance des SDA. L'une des plus couramment employées est la distance moyenne oiseau-système de première détection/classification par le dispositif. Cet estimateur atteste des capacités du système à détecter/classifier un oiseau à une certaine distance (voir par exemple McClure et al., 2018). Cependant, ce paramètre ne permet pas de connaître la proportion de trajets « à risque » que le système détecte/classifie comme tel. Or, certains arrêtés préfectoraux demandent explicitement aux opérateurs de parcs éoliens de démontrer que XX% des trajets sont détectés/classifiés avant une certaine distance seuil. De plus, c'est bien cette capacité à détecter/classer avant une certaine distance considérée comme à risque qui atteste que le système pourra permettre d'éviter des collisions (voir le WP3-R3 du programme MAPE pour des réflexions sur ces distances et l'application [eoldist](#) si ces distances ne sont pas précisées dans l'arrêté).

Ainsi, nous avons choisi, pour ce protocole, **la probabilité de détection/classification combinée que le système détecte un oiseau avant une certaine distance** comme paramètre à estimer pour quantifier les performances des SDA. Ce paramètre semble plus informatif et plus en adéquation avec les demandes réglementaires énoncées dans les arrêtés préfectoraux que les paramètres décrits dans la littérature. En effet, c'est la valeur de référence pour déterminer si le système détecte et classifie bien les objets à risque à temps. Cette probabilité de détection/classification est estimée en utilisant tous les trajets enregistrés par le moyen-tiers (voir partie suivante 1.2.2 sur le choix du moyen-tiers) avant cette distance seuil (figure 1).

A noter que le protocole ne s'intéresse pas aux faux positifs qui n'informent en rien le fait que les performances du SDA respectent les attendus réglementaires. Cependant il peut s'agir d'une information importante à prendre en compte pour les exploitants. L'estimation du nombre, ou du taux, de faux positifs est cependant très coûteuse (box 3).

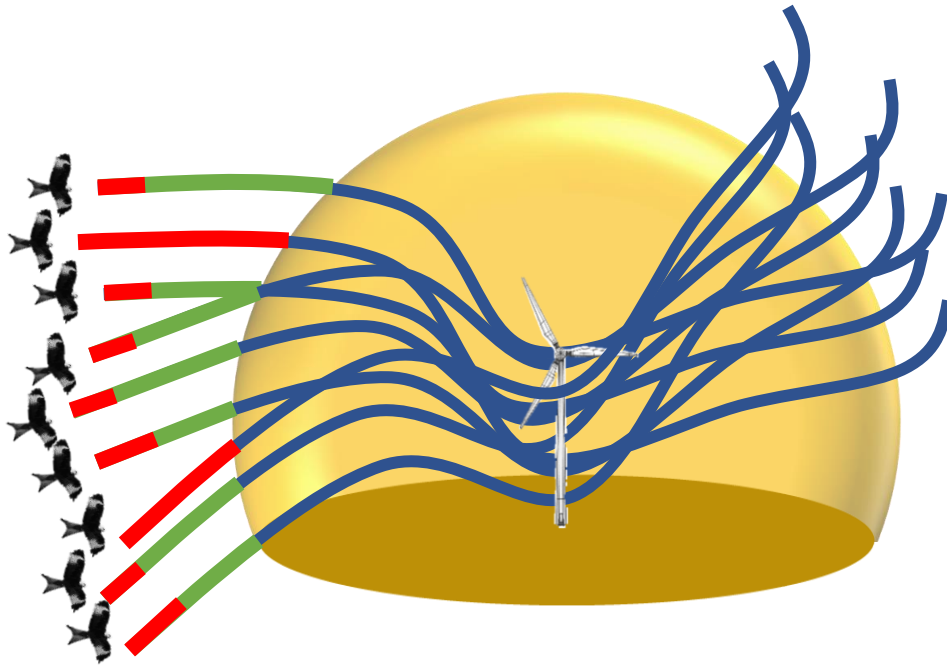


Figure 1 : Estimation de la probabilité de détection/classification combinée avant une certaine distance (sphère jaune) à partir des trajectoires relevées sur le terrain. La trajectoire prend la valeur « 1 » si elle est détectée/classifiée avant cette distance (portion de trajectoire verte) et « 0 » si elle n'est pas détectée/classifiée (portion de trajectoire rouge) avant cette distance.

1.2.2. **Le choix des moyens-tiers pour estimer ce paramètre**

L'estimation de la probabilité de détection/classification combinée avant une certaine distance implique de disposer :

- 1) Des données relatives aux événements qui ont été détectés et classifiés par les SDA.
- 2) Des géolocalisations d'oiseaux relevées par un moyen-tiers fiable et robuste.

La difficulté réside dans le fait de disposer de moyens-tiers qui soient les plus complets et les plus exhaustifs possibles pour servir de référence (voir la note de synthèse de Corbeau et Besnard [2021], qui illustre le biais d'évaluation lorsque ces critères ne sont pas remplis). Dans le cadre de ce protocole, deux moyens-tiers ont été retenus : le relevé de trajectoires d'individus sauvages d'espèces cibles équipés de balises GPS et le relevé de trajectoires d'oiseaux sauvages survolant le parc éolien d'intérêt par une paire d'observateurs humains équipée d'un télémètre laser.

Dans la note de synthèse de Corbeau et Besnard (2021), deux autres moyens-tiers ont également été évoqués : les drones et les oiseaux de fauconnerie. Néanmoins, la poursuite de nos échanges avec les fournisseurs de SDA, des télépilotes et des fauconniers professionnels, ainsi que la rencontre de chercheurs internationaux et chargés de mission de bureaux d'étude appliquant sur le terrain des protocoles d'évaluation des performances de ces dispositifs de réduction des mortalités aviaires ont fait évoluer notre réflexion concernant ces deux moyens-tiers.

- **L'utilisation de drones**

De prime abord, l'utilisation de drones avec géolocalisation 3D embarquée peut être considérée comme une approche précise des performances des SDA. Elle permet en effet d'acquérir une grande quantité de données sur un temps limité et assure un contrôle quasi-total de la trajectoire de la cible volante testée. Ceci assure d'avoir des estimations précises du fait de grandes tailles d'échantillons. Cependant, les drones ne miment pas les oiseaux. Ils n'ont pas la même taille, pas la même forme, pas la même réflectance, pas le même type de trajet (etc.) que des oiseaux. Il n'y a de ce fait aucune garantie que les algorithmes de classification des systèmes aient les mêmes taux de détection/classification pour des drones que pour des oiseaux. Par ailleurs, plus les algorithmes de classification évolueront, notamment via l'utilisation d'intelligence artificielle, plus ils auront tendance à exclure les drones comme des objets pertinents, ce qui conduira à biaiser négativement les performances des systèmes. A noter que certains algorithmes ont déjà été entraînés pour reconnaître les drones. Cependant, même dans cette situation, rien ne permet de certifier que la probabilité de détection/classification est identique pour les drones et les espèces cibles. Enfin, le fait de réaliser plusieurs dizaines de vol d'un drone sur un temps court ne permet pas d'obtenir des vols représentatifs des conditions météorologiques de vols réel d'oiseaux sauvages. Les vols de drones pourraient notamment avoir tendance à sur estimer la capacité de détection puisqu'ils sont généralement réalisés dans des conditions météorologiques optimales. L'ensemble de ces éléments fait qu'il est probable que les probabilités de détection/classification obtenues avec des drones soient biaisées par rapport à celle attendue avec des oiseaux sauvages. Cette approche a donc été exclue du protocole.

- **L'utilisation d'oiseaux de fauconnerie**

Les oiseaux de fauconnerie permettent d'appréhender de façon contrôlée et donc exhaustive la présence de cibles volantes dans l'environnement du SDA. Des vols pourraient *a priori* être organisés pour acquérir des géolocalisations 3D dans de nombreuses conditions proches de celles de vols d'oiseaux sauvages (arrière-plan,

visibilité, pluviométrie, nébulosité, luminosité, angle d'incidence du soleil, azimuth). Il est en effet possible de faire voler ces oiseaux dans des conditions météorologiques variées (entre 0°C et 40°C ; avec une pluie modérée ; avec un brouillard peu dense ; sous des vitesses de vent allant jusqu'à 27,8 m/s). De plus, l'équipement de ces oiseaux de balises de géolocalisation, relevant toutes les secondes la position 3D de l'oiseau, permet une analyse fine et poussée des performances de détection/classification des dispositifs. Cette méthode présente également l'avantage de mobiliser de vrais oiseaux. Il est par ailleurs possible de disposer d'oiseaux d'espèces de tailles variées et ciblées par des arrêtés préfectoraux dans certains parcs éoliens. La classification par les algorithmes est alors probablement représentative des oiseaux sauvages.

Toutefois, des limites rédhibitoires à l'utilisation de ce moyen-tiers pour les tests de performance ont été identifiées suite à la consultation de fauconniers professionnels. En effet, même en réalisant des tests avec des espèces dites de « haut vol » (faucon pèlerin, aigle royal ; à différencier des espèces de « bas-vol » comme les autours, faucon sacre, buse de Harris), les oiseaux ne sont généralement pas entraînés pour se déplacer à des hauteurs supérieures à 10 m. Par ailleurs, ces oiseaux de chasse sont généralement entraînés pour voler en ligne droite, à vitesse constante (~ entre 60 et 90 km/h, selon les espèces) et sur quelques dizaines de mètres maximum. Du fait de ces contraintes, il est rarement possible de générer des trajectoires variées et imprévisibles, pourtant proches de celles des oiseaux sauvages. Il n'est également pas possible de réaliser des vols au crépuscule et à l'aube car si un oiseau s'éloigne du site de lâcher (qui lui est inconnu) durant ces phases journalières de faible luminosité/visibilité, il y a un risque qu'il ne parvienne pas à revenir auprès de son fauconnier. Or, ces phases correspondent à des périodes de départ et de retour au nid pour certains oiseaux sauvages, donc à une proportion non négligeable de trajets d'oiseaux sauvages. De fait, le comportement de vol de ces oiseaux est potentiellement assez éloigné de celui d'oiseaux sauvages, ce qui peut biaiser leur détectabilité/classification par le dispositif de réduction des mortalités aviaires. Du fait de ces différentes contraintes cette approche a, elle aussi, été exclue du protocole.

- **L'utilisation d'individus sauvages équipés de balises GPS**

Certains individus d'espèces d'intérêt dans le cadre de la problématique éolienne utilisent les parcs comme zone de chasse ou de reproduction et peuvent alors être directement utilisés comme moyen-tiers de référence, en équipant ces individus de balises GPS à haute résolution. De fait, ils survoleront régulièrement et naturellement la zone d'intérêt et permettront alors d'acquérir passivement une grande quantité de données de géolocalisation, sur une échelle temporelle très fine (longitude, latitude, altitude toutes les secondes). Cependant, il faut noter que la pose de telles balises géolocalisatrices à résolution temporelle fine n'est possible actuellement que sur des espèces de grandes et moyennes tailles tels que les aigles, les vautours ou les milans,

du fait du poids de ces appareils. Cette approche ne sera pas pertinente pour de plus petites espèces (à noter qu'avec les progrès technologiques, il n'est pas exclu d'équiper des petits faucons avec des balises GPS similaires dans les années à venir). A noter aussi que déployer ce type de technologie implique, en particulier lorsqu'elle concerne plusieurs espèces différentes sur un même site, des autorisations parfois complexes à obtenir (Permis de capture d'oiseau validé annuellement par le Centre de Recherche sur la Biologie des Populations d'Oiseaux, au Museum National d'Histoire Naturel de Paris). Par ailleurs, cette approche méthodologique est relativement coûteuse (l'étape de capture d'un individu donné pour son équipement implique de mobiliser des spécialistes et est chronophage). Cette approche est donc très pertinente au vu de la quantité/qualité des données qu'elle peut fournir mais présente des limites certaines qui nécessite une évaluation approfondie pour chaque site.

- **L'utilisation d'une paire d'observateurs équipée d'un télémètre laser**

La mobilisation simultanée de deux observateurs humains complémentaires sur le terrain et l'utilisation de jumelles à télémètre laser intégré sont les deux conditions *sine qua non* pour que ce moyen-tiers puisse être considéré comme robuste et fiable. En effet, comme souligné dans Corbeau et Besnard (2021), individuellement, les humains possèdent des capacités de détection généralement plus faibles que celles des SDA (McClure et al., 2018). De ce fait, ni le SDA, ni les observateurs humains ne sont exhaustifs. Ceci pose problème pour estimer les probabilités de détection/classification combinées du SDA avant une certaine distance. En effet, certains trajets à risque pourront avoir été ratés par les deux types de systèmes d'observation.

Cette difficulté de détection non-exhaustive des deux systèmes d'observation est un problème classique en recherche en écologie qui a été exploré dans les années 1960 pour estimer les effectifs d'une population via deux comptages indépendants. La méthode utilisée dans ce contexte s'appelle l'indice de « Lincoln-Peterson ». Elle implique que les individus soient identifiés, c'est-à-dire qu'il est possible de déterminer quels sont ceux qui n'ont été détectés que par un seul système d'observation et ceux qui au contraire ont été détectés par les deux systèmes d'observation simultanément. Le raisonnement à la base de cette méthode peut être adapté au problème de l'estimation de la probabilité de détection/classification des SDA avec ici comme individus les trajets d'oiseaux transitant par la zone d'intérêt (box 1). Pour être pertinente, cette approche implique que la probabilité de détection des observateurs soit indépendante de la probabilité de détection par le SDA.

Etant donné que tous les SDA ne mesurent pas la distance entre l'objet détecté et le dispositif, il est aussi obligatoire que le moyen-tiers de référence palie à ce manque en acquérant cette donnée de manière précise. Les jumelles à télémètre laser intégré sont un appareil de mesure permettant d'obtenir d'une part la distance entre l'objet visé et le télémètre laser mais aussi de collecter des informations sur la géolocalisation

de l'objet ciblé ainsi que l'azimut de mesure. Ce relevé de données par les observateurs humains équipés d'un télémètre laser peut donc suffire pour estimer la probabilité de détection/classification combinée avant une certaine distance même en absence de mesure de distance par le SDA.

Cette approche via des observateurs humains présente l'avantage d'être déclinable dans n'importe quel parc et pour n'importe quelle espèce. Lorsqu'il s'agit d'espèces cibles qui fréquentent peu le parc, il est éventuellement possible de collecter des trajets sur des espèces de même taille et présentant le même type de vol (box 2, voir aussi la question du nombre de trajets nécessaire pour obtenir des estimations suffisamment précises à la fin de ce document).

Box 1 – Application de l'indice de Lincoln-Peterson pour estimer la probabilité de détection/classification combinée avant une certaine distance

La méthode utilisée classiquement en écologie pour estimer le nombre total d'objets présents lorsque **deux observateurs indépendants** ne sont pas exhaustifs s'appelle l'indice de « Lincoln-Peterson ». Elle implique que les « individus » (dans le cas qui nous intéresse ici, les trajets suivis) soient identifiés, c'est-à-dire qu'il est possible de déterminer quels sont ceux qui n'ont été détectés que par un seul système d'observation et ceux qui, au contraire, ont été détectés par les deux systèmes d'observation simultanément.

L'indice de Lincoln-Peterson se formule ainsi : $N_{tot} = \frac{(N_{obs}+1) \times (N_{sys}+1)}{N_{com}+1}$ (eq. 1)

Avec N_{obs} = nombre de trajets détectés par l'observateur humain avant une certaine distance (connu car mesuré par l'observateur), N_{sys} = nombre de trajets détectés par le système avant une certaine distance (pas systématiquement connu car certains systèmes ne mesurent pas les distances aux cibles détectées), N_{tot} = nombre total de trajets avant cette distance (pas connu car certains trajets peuvent être ratés par les deux systèmes d'observation), N_{com} = nombre de trajets détectés en commun (observateur humain + système, connu grâce à la mise en correspondance des données de détection/classification relevées par le SDA avec celles obtenues par les observateurs humains).

Le principe de cet indice repose sur l'idée que la proportion de trajets détectés par le SDA au sein des trajets détectés par les observateurs humains équipés d'un télémètre laser est une estimation non-biaisée de la proportion de trajets détectés par le SDA au sein de l'ensemble des trajets qui ont eu lieu lors du test. L'estimation du nombre total de trajets s'obtient donc par une simple règle de trois.

Dans le cas des SDA, nous ne cherchons pas particulièrement à avoir une estimation du nombre total de trajets mais simplement de la probabilité de détection/classification combinée par le système avant une certaine distance. Le principe est donc encore plus simple. Ainsi, si on pose : P_{obs} = Probabilité de détection/classification combinée d'un oiseau par l'observateur humain avant une certaine distance, P_{sys} = même chose pour le SDA (paramètre que l'on cherche à estimer),

On peut donc écrire : $P_{obs} = \frac{N_{obs}}{N_{tot}}$ (eq. 2) ; $P_{sys} = \frac{N_{sys}}{N_{tot}}$ (eq. 3) ; $N_{com} = N_{tot} \times P_{obs} \times P_{sys}$ (eq. 4)

En réorganisant les eq. 3 et eq. 1, on obtient $N_{com} = N_{obs} \times P_{sys}$ (eq. 5)

Soit tout simplement $P_{sys} = \frac{N_{com}}{N_{obs}}$ (eq. 6)

La variance de cet estimateur peut être facilement obtenue par une modélisation de type modèle linéaire généralisé avec une distribution binomiale des données.

Il est important de savoir que la précision de l'estimation dépend fortement des probabilités de détection des deux systèmes : plus ces probabilités sont élevées, plus les estimations sont précises.

L'hypothèse que les deux systèmes d'observation sont indépendants est cruciale pour pouvoir écrire l'équation 4 (multiplication des probabilités de détection des deux systèmes d'observation).

Box 2 – Espèces proches pouvant être regroupées

Dans le cadre du protocole « parc » lorsqu'une espèce cible fréquente peu le parc et implique de fait un très grand nombre de jours de terrain pour obtenir un nombre raisonnable de trajets, il est possible d'utiliser les trajets d'autres espèces dans la même classe de taille. Ces classes peuvent être par exemple :

- Les oiseaux de grande taille (envergure supérieure à 150 cm) tels que les vautours, l'aigle royal, le pygargue à queue blanche, les deux cigognes ou la grue cendrée, le circaète Jean-le-blanc, l'aigle de Bonelli, le balbuzard pêcheur, hérons cendrés, cygnes et oies.
- Les oiseaux de taille moyenne (envergure comprise entre 100 cm et 150 cm) tels que l'aigle botté, le milan royal, le milan noir, la buse variable, la bondrée apivore, l'autour des palombes ou les trois busards, les hérons et pourprés, le grand corbeau, les goélands.
- Les autres oiseaux de petite taille (envergure inférieure à 100 cm) tels que tous les faucons, l'élanion blanc ou l'épervier d'Europe, les autres corvidés, les pigeons.

Box 3 –Le nombre de faux positifs pour un système optique de détection-réaction

Le taux (ou nombre) de faux positifs correspond aux évènements de détection/classification de cibles qui ne sont pas des oiseaux, ou qui sont des oiseaux mais dans des situations qui ne sont pas à risque, et qui sont pourtant considérées comme tel, engendrant une réaction inutile du système dans le contexte de la réduction des mortalités aviaires. Il est fortement dépendant du contexte de chaque parc (notamment, du nombre d'oiseaux et d'objets volants non-cibles tels que les avions, les insectes etc. présents dans l'environnement de l'éolienne ainsi que des mouvements du paysage). N'étant pas un élément qui permet de vérifier l'adéquation entre les performances du système et les arrêtés préfectoraux, l'estimation du nombre de faux positifs n'est pas développée dans le protocole. En revanche, ces faux positifs représentent une perte de production pour les opérateurs. Il peut donc y avoir un intérêt à l'évaluer pour que les opérateurs puissent mesurer les risques de perte de production en fonction du paramétrage actuel du système.

Il existe en général une corrélation négative entre le nombre de faux positifs et de faux négatifs. En effet, un système qui est paramétré pour maximiser la détection/classification d'oiseaux d'espèces cibles (faible taux de faux négatifs) conduit irrémédiablement à une augmentation de la détection d'objets dont certains sont non-pertinents dans le cadre de la problématique de réduction des mortalités aviaires (fort taux de faux positifs). Il peut donc aussi être intéressant pour un opérateur de mesurer le taux de faux positifs du SDA installé sur un parc éolien, afin d'évaluer sa marge de manœuvre sur le paramétrage de la sensibilité de détection/classification des objets volants par le système (possibilité ou non d'augmenter la détectabilité sachant la perte de production associée et les exigences réglementaires appliquées au parc en termes de performances de détection/classification). Ces évènements de faux positifs peuvent être évalués *a posteriori* par visionnage des clichés/vidéos enregistrés par le SDA lors des évènements détectés/classifiés à risque de collision. Il convient de mobiliser un observateur humain expérimenté en ornithologie afin d'identifier – à l'espèce près – la cible volante relevée par le système : un 0 sera attribué si l'objet volant correspond à un individu d'une espèce d'intérêt ; un 1 sera noté si l'objet volant ne correspond effectivement pas à une espèce ciblée par arrêté préfectoral sur ce parc éolien (= erreur de détection/classification du système). Il s'agit donc d'une démarche particulièrement chronophage et donc coûteuse.

A noter qu'à ce stade, aucune méthodologie n'a encore été définie pour évaluer ce nombre de faux positifs avec des SDA mobilisant la technologie radar.

1.3. Probabilité de réaction du SCADA

Ce paramètre est essentiel à estimer car il permet de prendre en compte qu'une réaction est effectivement déclenchée lorsque le SDA considère qu'un arrêt de la turbine (arrêt machine) est nécessaire. Il correspond à la probabilité que le SCADA prenne en compte l'ordre d'arrêt machine émis par le SDA. Son estimation repose sur la comparaison du nombre journalier d'ordres d'arrêt machine générés par le SDA et celui réellement émis par le SCADA. Ces informations sont disponibles du fait de l'étroite communication qu'il existe entre le SDA et le SCADA de l'éolienne.

Cette partie des analyses ne nécessitant pas de donnée de la part d'un moyen-tiers (observateur humain), il est tout à fait possible de récupérer les données de détection/classification/réaction du SDA et les données d'arrêt du SCADA sur une année entière pour évaluer finement la prise en compte des ordres d'arrêt tout au long de l'année. Dans le cas où un parc ne disposerait pas d'un an de données, il est possible d'utiliser/exploiter les données à disposition sur le parc et de faire évoluer cette probabilité au fur et à mesure que les données s'accumulent.

A noter que le protocole ne s'intéresse pas au temps de ralentissement des éoliennes puisque ce n'est pas un critère de performances du SDA. Ce temps de ralentissement dépend essentiellement des caractéristiques de l'éolienne. Cependant, ce temps est important à connaître/mesurer par les opérateurs pour définir les distances seuil à considérer comme à risque (box 4).

Box 4 – Le temps de ralentissement de l'éolienne pour atteindre l'arrêt machine

Si le temps de réaction du SCADA à l'ordre du SDA de même que le temps de ralentissement de l'éolienne ne sont pas dépendants du SDA, nous préconisons malgré tout de les mesurer. En effet, cette étape permettra d'évaluer si la distance seuil précisée dans l'arrêté préfectoral est pertinente pour définir la zone à risque autour de l'éolienne d'intérêt, en regard du temps de ralentissement effectif (mesuré sur le parc) et des vitesses de vol des espèces cibles.

La vitesse de vol des espèces d'intérêt (i.e. espèces protégées notamment) est en effet primordiale à considérer lors de la définition de la distance de détection dans les arrêtés préfectoraux en vigueur dans un parc éolien donné (voir la note de synthèse de [Fluhr et Duriez, 2021](#), s'intitulant « Déterminer les distances de détection minimales des oiseaux pour réduire les risques de collision avec les installations éoliennes : Synthèse des connaissances relatives au vol et aux vitesses de vol des oiseaux. »). Les travaux menés dans le cadre du WP3-R3 du programme de recherche MAPE soulignent également l'importance de prendre en compte les caractéristiques techniques des éoliennes (longueur des pales, type de rotor – synchrone ou asynchrone) pour la définition de la zone à risque autour des éoliennes. Ceci s'explique notamment du fait de l'influence significative de ces paramètres sur le temps de ralentissement de l'éolienne suite à la prise en compte d'un ordre d'arrêt turbine par le SCADA. Ainsi, selon le temps nécessaire à l'éolienne pour atteindre la vitesse d'arrêt turbine (i.e. 50 km/h, proposée par KNE par exemple), la définition de la distance oiseau/éolienne à risque et les performances de détection/classification du système ne seront pas les mêmes. L'évaluation du temps de ralentissement de l'éolienne est donc un paramètre essentiel à réaliser afin de valider la cohérence des exigences réglementaires en vigueur sur le parc avec la biologie des espèces d'intérêt et les enjeux de conservation qui y sont associés. L'utilisation de [l'application eoldist](#) peut permettre de définir ces distances. L'utilisation du protocole de mesure des temps de ralentissement proposé dans le cadre du WP3-R3 de MAPE est aussi pertinente dans cet objectif.

2. Acquisition des données sur le terrain

2.1. Réglages du SDA et période d'étude

Les tests de terrain devront être effectués strictement dans les mêmes conditions, avec les mêmes paramétrages (filtres appliqués, espèces ciblées, distance de détection, réaction mise en place) et réglages techniques (orientation des caméras, hauteur de fixation etc.) que dans les conditions « normales » d'opérationnalité du système pour réduire les mortalités aviaires sur ce parc.

La temporalité des relevés terrain sera adaptée selon les espèces ciblées et les enjeux de conservation définis par l'arrêté préfectoral en vigueur sur le parc éolien à évaluer. Concrètement, si les espèces ciblées se reproduisent à proximité du site éolien, l'évaluation des performances du SDA choisi devra se réaliser durant la période de reproduction de ces espèces, qui est alors considérée comme leur période à risque de collision/mortalité sur site éolien. Si la problématique sur un parc repose sur le passage d'espèces cibles durant leur transit migratoire, alors l'évaluation devra être conduite durant cette période spécifique de l'année. De fait, la période de tests devra couvrir la ou les situation(s) pertinente(s)/à risque au vu de la biologie des espèces ciblées par les exigences réglementaires appliquées au parc.

En dehors de ce choix de la période adaptée, il n'est pas nécessaire de choisir des météorologies particulières pour réaliser le protocole. Ce protocole sera au contraire déployé dans des conditions environnementales choisies aléatoirement pour obtenir une performance moyenne du système (et non uniquement dans les conditions optimales de détection comme cela a en général été réalisé dans les évaluations antérieures de ces dispositifs, Corbeau et Besnard [2021]). Effectuer les relevés sur des journées de terrain choisies aléatoirement au cours de l'année lors des périodes de fortes activités permettra d'obtenir une bonne représentativité des conditions dans lesquelles les oiseaux volent. Ceci assure que les performances estimées sont bien conformes aux performances moyennes des systèmes sur l'ensemble de l'année et donc d'être non-biaisées.

2.2. Acquisition des données des cibles via un moyen-tiers

2.2.1. Utilisation d'individus sauvages équipés de balises GPS

Si l'étude des performances repose sur l'utilisation d'oiseaux équipés de GPS, les données enregistrées seront accessibles uniquement sur volonté des porteurs de programmes de baguage correspondants. Il conviendra de récupérer les informations suivantes : la date (format : « jj/mm/aaaa »), l'heure (format : « hh:mm:ss »),

l'horodatage réseau doit être utilisé pour être strictement identique à celui des autres appareils de mesure et ainsi permettre une mise en correspondance plus aisée des différents jeux de données), la latitude (format WGS84 : degrés décimaux), la longitude (format WGS84 : degrés décimaux), l'altitude (format : m) et l'espèce (et la classe de taille correspondante). A noter que certains modèles de balises GPS permettent de définir des zones (appelées « géofences ») dans lesquelles le relevé de positions 3D se fait en haute résolution (c'est-à-dire un point enregistré toutes les secondes ou toutes les trois secondes) à l'intérieur de ces dernières ; et en basse résolution (c'est-à-dire un point enregistré toutes les XX minutes ou heures) à l'extérieur. Dans le cadre de notre protocole, il conviendra de définir cette géofence avec un rayon de 1 000 m autour du SDA pour acquérir les données les plus précises possibles sur notre zone d'intérêt.

2.2.2. Utilisation d'observateurs humains équipée d'un télémètre laser

Il convient de souligner un certain nombre de prérequis pour que cette approche expérimentale puisse être considérée comme robuste :

- Les deux observateurs humains devront être expérimentés, avertis et formés pour la reconnaissance des espèces cibles rencontrées sur le terrain. Un observateur humain est considéré comme expérimenté quand il a l'habitude des comptages et/ou des inventaires d'oiseaux, notamment en conditions difficiles et durant plusieurs heures consécutives. Il doit également être capable d'identifier en routine et à de grandes distances l'ensemble des espèces cibles fréquentant possiblement le site (et *a fortiori* l'espèce cible du SDA).
- Les deux observateurs devront également avoir participé à une réunion préparatoire pour recevoir les instructions sur le déroulement du protocole (idéalement par l'animateur de la démarche, si un tel animateur existe dans le futur).
- Des jumelles à télémètre laser intégré (instrument de mesure parfois appelé aussi ornithodolite) devront être utilisées pour relever les géolocalisations 3D (longitude, latitude, altitude) des oiseaux tout au long de leurs trajets autour des éoliennes. Le modèle communément utilisé dans les études scientifiques est le Safran® Vectronix Vector 21 (Borkenhagen et al., 2018, Darras et al., 2018, Cole et al., 2019, Therkildsen et al., 2021).
- Les deux observateurs humains et le télémètre laser seront positionnés à une distance suffisante des éoliennes à surveiller (entre 50 m et 300 m) et à au moins 10 m des voitures. Cela permettra, d'une part, d'optimiser le champ de vision des observateurs et, d'autre part, d'éviter les interférences électromagnétiques par les éoliennes, le SDA ou les voitures sur le télémètre, pouvant générer

d'éventuelles erreurs dans les mesures réalisées. A noter que les câbles souterrains peuvent aussi créer des interférences électromagnétiques et qu'il n'est pas possible de connaître leur localisation à l'avance. Il sera donc parfois nécessaire de déplacer les points d'observation si la précision des mesures du télémètre s'avère trop faible.

- Le télémètre laser sera calibré avant son utilisation, au moins au début de chaque semaine de relevés, pour assurer la précision de mesure.
- Le degré de déclinaison magnétique sera corrigé sur le télémètre laser au début de chaque semaine de relevés.
- Le relevé de trajets se fera sur une sphère de 1 000 m de rayon par rapport à l'éolienne surveillée.
- La sauvegarde des données relevées par l'ornithodolite se fera sur une tablette, directement sur le terrain grâce à l'application LRF DataViewer (même en présence de pluie). Les données enregistrées sur l'application au fur et à mesure de la journée devront être exportées toutes les heures au format « .csv » afin de créer des sauvegardes sur la tablette. Chaque position sera automatiquement associée à un identifiant chiffré (attribué par ordre croissant) et sera reportée sur une carte avec fond orthophotographique en temps réel au moyen d'une icône et du chiffre correspondant. Afin de retrouver les points correspondants au même trajet, l'observateur humain ayant le rôle de scribe (voir ci-dessous pour la répartition des rôles) devra renommer le premier et dernier point du trajet avec le même identifiant.
- Un horodatage de la tablette, identique à celui du SDA, devra impérativement être effectué avant le relevé des premières mesures. La similitude des fuseaux horaires entre les jumelles à télémètre laser intégré et le SDA sera vérifiée en se connectant à l'interface de contrôle du dispositif de réduction des mortalités aviaires. Le cas échéant, il sera déterminé le décalage horaire qu'il existe entre les deux horodatages afin de pouvoir faire correspondre les données enregistrées par ces deux appareils (SDA et jumelles à télémètre laser intégré) *a posteriori*.

Le « Guide d'accompagnement au déploiement des protocoles d'évaluation des performances des systèmes de détection-réaction » disponible sur le site MAPE, permet d'obtenir plus de précision sur les points mentionnés ci-dessus et notamment concernant le choix du point d'observation, le calibrage du télémètre laser, la correction du degré de déclinaison magnétique, l'utilisation de l'application LRF DataViewer ou encore le contrôle de l'horodatage.

Les deux observateurs humains scruteront le ciel à l'aide de jumelles binoculaires ou longues-vues, pour détecter puis identifier les espèces. Ils réaliseront ces observations sur une plage de six heures consécutives selon un schéma standardisé. Ils enchaîneront six fois de suite la séquence suivante : 45 min d'observation ; 15 min de pause. Cette durée doit permettre d'optimiser le temps d'observation par journée de terrain tout en

assurant une attention maximale des deux observateurs sur toute la durée de la période de récolte de données. Afin de prendre en compte une diversité de conditions de vols représentatifs de la fréquentation du site par les oiseaux, l'heure de début de la journée de six heures d'observation sera différente d'un jour à l'autre (tableau 1). Parmi les différents horaires de début et de fin d'observation, il faudra des journées qui commencent au lever du soleil et d'autres qui finissent au coucher du soleil.

Tableau 1 : Exemple de plages horaires de six heures consécutives pour réaliser la récolte des données lors des jours de terrain par la paire d'observateurs humains équipée d'un télémètre laser

Jour 1	Jour 2	Jour 3	Jour 4	Jour 5	Jour 6	Jour 7	Jour 8	Jour 9	Jour 10
7H30 – 13H30	12H30 – 18H30	9H00 – 15H00	14H00 – 20H00	10H30 – 16H30	13H00 – 19H00	8H00 – 14H00	14H30 – 20H30	8H30 – 14H30	10H00 – 16H00

Lorsqu'un oiseau de l'espèce cible (ou de même taille le cas échéant) s'approchera de la zone d'intérêt (i.e. sphère de 1 000 m de rayon autour de l'éolienne), l'un des observateurs suivra l'oiseau à l'aide du télémètre laser et deviendra alors collecteur de données. Il relèvera toutes les 5 s (délai d'acquisition entre deux points successifs pour un observateur humain entraîné à l'utilisation du télémètre laser) la position de l'oiseau, tout au long de sa trajectoire.

Le second observateur humain sera le scruteur de ciel. Il assurera à l'œil nu (pour maximiser le champ de vision surveillé) une veille des environs du dispositif pour avertir le collecteur de données qu'un autre oiseau intéressant à suivre est disponible (i.e. espèce cible à 1 000 m ou moins de l'éolienne) une fois que l'oiseau en cours de suivi par le télémètre n'est plus considéré comme pertinent (car s'éloignant de la zone à risque par exemple). **A noter qu'il est très important pour la robustesse des analyses de privilégier le suivi d'une longue trajectoire pour quelques individus plutôt que de courts fragments de trajets pour beaucoup d'oiseaux.**

Le scruteur de ciel s'occupera également de prendre en note toutes les informations énoncées par le collecteur de données : début et fin d'un trajet (relevé des identifiants des points associés) ; confirmation de l'espèce de l'oiseau ciblé avec le télémètre laser ou *a minima* sa classe de taille, suppression immédiate des potentielles erreurs de localisations/distances relevées au télémètre (aisément identifiable selon les distances mesurées juste avant et juste après ou en regardant la position du point sur la cartographie de l'application LRF DataViewer).

Le scruteur de ciel devra relever l'information de la présence simultanée de plusieurs oiseaux sur le terrain (un seul oiseau ou plusieurs oiseaux). Certains SDA n'ont pas la possibilité d'indiquer la position de l'oiseau détecté (azimut ou position GPS). Ainsi, pour ces systèmes, lors des analyses, il faudra supprimer les trajectoires pour

lesquelles plusieurs oiseaux étaient présents simultanément sur le terrain car il ne sera pas possible de déterminer lequel était concerné par la détection du SDA.

Les observateurs peuvent échanger leur rôle au cours d'une semaine de relevés, tant que l'observateur au télémètre est formé à son utilisation. Au cours d'une journée, les rôles devront, dans la mesure du possible, être conservés. Un modèle de fiche terrain est disponible dans le « Guide d'accompagnement au déploiement des protocoles d'évaluation des performances des systèmes de détection-réaction » disponible sur le site MAPE.

Le protocole ayant pour objectif de vérifier que la performance globale du système à l'échelle du parc est en adéquation avec les exigences des arrêtés préfectoraux en vigueur, il est important que les points d'observation changent régulièrement (tous les jours) pour que le protocole couvre l'intégralité des éoliennes du parc.

Lors des analyses, il faudra sélectionner les trajectoires impliquant uniquement l'espèce d'intérêt ou des individus d'une espèce de taille similaire (si cette option a été retenue du fait de la faible fréquentation du parc par l'espèce cible) en fonction du SDA évalué et selon ce qui aura été relevé sur le terrain :

- Les analyses pour les systèmes basés sur l'utilisation d'algorithmes d'intelligence artificielle détectant et classifiant les cibles volantes à l'espèce ne devront être réalisées que sur l'espèce d'intérêt uniquement.
- Les analyses pour les SDA qui détectent et classifient selon la taille des objets volants pourront être réalisées sur des espèces de taille et couleur de plumage similaires à l'espèce d'intérêt si cette option a été retenue.

Les tests réalisés sur le terrain en 2022 ont montré qu'il existait un certain nombre de situations où les observateurs avec télémètre et le SDA n'avaient pas des probabilités de détection indépendantes (Ballester et al., 2023). Cette hypothèse d'indépendance est pourtant importante/primordiale pour que les estimations des performances soient non-biaisées. Malheureusement, aucune solution n'existe pour remédier aux quelques cas identifiés qui conduisent tous à une légère sur-estimation des performances (box 5).

Box 5 – Cas de non-indépendance entre observateurs avec télémètre et SDA

L'utilisation du télémètre laser a posé problème dans certaines conditions lors de la phase de test des protocoles sur le terrain courant 2022, problèmes qui ont des conséquences sur l'estimation des performances de détection/classification des SDA.

Ainsi, lors du suivi de trajectoires d'oiseaux sur fond de végétation, la distance relevée par le télémètre est souvent celle entre le télémètre et l'arrière-plan et non celle entre le télémètre et l'oiseau (qui est pourtant celle qui nous intéresse). Ces erreurs induisent un biais puisqu'il est alors difficile d'enregistrer les trajectoires des oiseaux volant au ras du sol ou à proximité des zones de végétation denses. Or, ces configurations sont aussi probablement plus difficiles à détecter par les SDA.

En présence de pluie et de vent ou d'une forte pluie, il n'est pas possible de protéger correctement le télémètre laser tout en poursuivant les relevés de trajectoires. Etant un appareil de mesure coûteux, la récolte de données ne peut donc être réalisée dans de telles conditions météorologiques. La prise de mesure en condition de brouillard n'est par ailleurs pas possible. En effet, le laser est réfléchi par les gouttes qui composent le brouillard, générant des distances ne correspondant pas à celles entre le télémètre et les objets/cibles. Ainsi, les possibilités d'effectuer des relevés en condition de pluie et de brouillard sont limitées. Les conditions très défavorables à la préservation du matériel ou à la prise de mesure sont probablement aussi celles limitantes pour la détection des SDA.

Ainsi, les capacités de détection avec le télémètre laser ne sont pas totalement indépendantes de celles des systèmes. L'approche de modélisation retenue pose pourtant l'hypothèse d'une indépendance de la détection entre observateur et système qui est ici violée pouvant de fait conduire à une estimation biaisée des performances. Dans les deux situations ci-dessus, le biais conduit à surestimer les capacités de détection des systèmes puisque les observateurs ont moins de trajectoires dans des conditions de potentielle faible détection des SDA dans les données que ce qu'il y a dans la réalité.

Enfin, en présence de plusieurs oiseaux, pour les SDA n'ayant pas la possibilité de collecter une information sur la position géographique ou l'azimut de l'oiseau détecté, il est alors impossible de savoir si l'oiseau suivi avec le télémètre correspond à celui détecté par le système. La solution pour ces systèmes est alors de noter les trajectoires concernées par la présence de groupe d'oiseaux dans la zone à risque afin de pouvoir supprimer ces trajectoires lors des analyses de données. Ceci peut à nouveau conduire à surestimer les performances des SDA si ceux-ci détectent aussi moins bien quand il y a plusieurs oiseaux en activité autour de parc. Par ailleurs, si la présence simultanée d'oiseaux n'est pas notée, une détection par le télémètre peut être considérée comme détectée par le SDA alors que le SDA n'avait pas détecté cette cible mais un autre oiseau du même groupe par exemple. De ce fait, les capacités de détection des SDA qui n'ont pas l'information de la position de l'oiseau peuvent être surestimées.

3. Traitement et modélisation statistique des données acquises sur le terrain

D'un point de vue analytique, le protocole « parc » vise à estimer :

- 1) La probabilité que le SDA fonctionne ou non (étape de fonctionnement)
- 2) La probabilité de détection/classification pour l'espèce ciblée et avant la distance **oiseau/éolienne** fixée dans l'arrêté préfectoral en vigueur sur ce parc.
- 3) La probabilité que le SCADA prenne en compte l'ordre d'arrêt machine émis par le SDA

La probabilité que le système fonctionne et sa précision s'estiment à l'aide d'un simple modèle linéaire généralisé (GLM par la suite) avec une Loi Binomiale et un lien *logit* en utilisant, pour chaque jour de relevés de terrain, le fait que le système est fonctionnel (noté 1) ou non (noté 0). Si le nombre de jours utilisé pour l'analyse est important, la probabilité estimée sera très précise. Elle pourra être mise à jour au fil de l'eau en analysant régulièrement les séries de données disponibles afin d'être plus précise et pour vérifier qu'elle n'évolue pas dans le temps.

De la même manière, la probabilité que le SCADA prenne en compte l'ordre d'arrêt du SDA peut se modéliser avec un simple GLM avec une Loi Binomiale et un lien *logit* en modélisant le nombre d'ordres pris en compte par le SCADA par rapport au nombre d'ordres émis par le SDA. Cette estimation va reposer sur un nombre parfois très important d'ordres d'arrêts émis en peu de temps. Cette probabilité sera donc rapidement précise. Il convient de la ré-évaluer régulièrement pour vérifier qu'elle n'évolue pas dans le temps.

L'estimation de la probabilité de détection/classification combinée du système avant une certaine distance est plus complexe à modéliser. Elle correspond à la proportion de situations où le système a détecté/classifié un oiseau de l'espèce d'intérêt avec une trajectoire à risque parmi l'ensemble des trajets d'oiseaux équipés de GPS ou ceux ayant été détectés/classifiés comme tels par la paire d'observateurs humains équipée d'un télémètre laser et cela avant une certaine distance.

Pour obtenir cette estimation, il convient de mettre en correspondance les trajectoires relevées par les observateurs (grâce aux jumelles avec télémètre laser intégré) ou les trajectoires des oiseaux équipés de balise GPS dans les 1 000 m autour de l'éolienne avec les données collectées par le SDA dans cette même zone. A noter que dans le cadre de cette procédure, nous excluons du jeu de données à analyser les trajets ou portions

de trajets qui s'éloignent de l'éolienne. En effet, ces situations ne présentent pas un risque de collision pour les oiseaux et ne présentent donc aucun intérêt pour cette évaluation de performance des SDA. Ces trajets ou portions de trajets sont identifiés avant analyse en utilisant la localisation des points successifs.

Concrètement, la distance entre l'oiseau et le moyeu de l'éolienne sera calculée via des formules utilisant les positions géographiques de ces derniers (voir les guides des scripts d'analyses de données). En effet, au vu des prérequis détaillés dans la partie 2.2.2., ces derniers ne seront pas exactement au même endroit que l'éolienne. Cela nécessitera de recalculer la distance oiseau-éolienne en utilisant les coordonnées 3D de l'oiseau (enregistrées par le télémètre ou par une balise GPS pour les oiseaux équipés) et les coordonnées 3D de l'éolienne ainsi que la hauteur du moyeu (fournies par l'opérateur). De plus, il est nécessaire de mesurer une distance réelle entre l'oiseau et le moyeu de l'éolienne et non pas une simple distance projetée sur le sol, afin d'intégrer le fait que l'observateur et le moyeu ne sont pas à la même hauteur.

A noter que l'altitude mesurée par le télémètre et les balises GPS posées sur les oiseaux correspondent à l'altitude par rapport au niveau de la mer. Dans le cadre de ces deux approches expérimentales, il faudra donc exprimer/utiliser l'altitude du moyeu par rapport au niveau de la mer. Cette valeur n'est généralement pas donnée par les opérateurs/fournisseurs et seule la hauteur du SDA peut être obtenue. Il faudra alors corriger l'altitude du moyeu en additionnant sa hauteur à celle de l'altitude de la localisation fournie par un MNT (Modèle Numérique de Terrain).

Pour réaliser la mise en correspondance entre les deux jeux de données (moyen-tiers *versus* SDA), il convient de rechercher, parmi les données enregistrées par le SDA, le moment où le trajet relevé au télémètre ou enregistré par le GPS de l'oiseau sauvage est détecté pour la première fois par le SDA. Ceci doit se faire par la mise en relation des heures de détection/classification. Il est donc crucial que l'horodatage du télémètre laser et du GPS des oiseaux équipés soient strictement identiques à celui du SDA. Il est important de rappeler ici que le télémètre laser enregistre une localisation toutes les 5 secondes environ, tandis que le SDA en collecte en continu. La correspondance entre les deux jeux de données se fait donc via l'identification du relevé du SDA le plus proche temporellement de celui du télémètre laser ou de la balise GPS. Une tolérance de plus ou moins 20 secondes est acceptée mais cette tolérance peut être modifiée dans les scripts d'analyse.

Une fois que cette recherche est accomplie, le plus simple pour constituer le jeu de données à analyser est de partir du fichier brut regroupant les géolocalisations 3D collectées par le télémètre (ou celui issu du GPS des oiseaux équipés, dans le cas d'un suivi passif par balises géolocalisatrices), après exclusion des portions de trajets s'éloignant de l'éolienne. Concrètement, une colonne renseignant sur la détection du trajet ou non par le dispositif de réduction des mortalités aviaires sera complétée/ajoutée : sur chaque trajet, un « 1 » sera attribué à la première position de correspondance entre relevé télémètre/trajet GPS et l'évènement de

détection/classification par le système. Cette procédure implique de considérer que si le système a détecté un trajet à une certaine distance, alors ce trajet est considéré comme détecté à des distances inférieures. Si sur un trajet aucune position n'obtient de correspondance avec les relevés télémètre/trajet GPS, un « 0 » sera attribué dans la colonne « détection du trajet ».

Lors de cette mise en correspondance des jeux de données générés par le moyen-tiers et le SDA, seuls les évènements de détection/classification avant la (les) distance(s) seuil exigée(s) par l'arrêté préfectoral en vigueur sur ce parc - seront conservés. Cela permettra de déterminer la probabilité qu'il y ait eu détection/classification ou non d'un oiseau d'une espèce cible avec une trajectoire à risque avant la distance seuil souhaitée, par rapport à l'éolienne.

Par ailleurs, comme explicité partie 2.2., les analyses se concentreront sur la ou les espèce(s) d'intérêt selon les exigences réglementaires sur le parc. Les modèles statistiques élaborés dans le cadre de ce protocole « parc » ne prendront en compte qu'une seule espèce cible à la fois (ou d'une classe de taille le cas échéant).

Enfin, ce protocole « parc » s'attache à déterminer la probabilité moyenne de détection/classification des cibles par le système au sein du parc. Aucune variable environnementale ne sera, de fait, considérée dans les modèles statistiques. Une fois que l'information sur la détection ou non de la trajectoire relevée par les observateurs par le SDA est disponible, ces données sont analysées à l'aide d'un GLM basé avec une Loi Binomiale et un lien *logit*.

Les trois probabilités (associées aux trois étapes listées ci-dessus) et leurs incertitudes sont donc estimées avec de simples modèles linéaires généralisés. La probabilité globale de détection/classification/réaction avant la distance seuil précisée dans l'arrêté, c'est-à-dire la performance globale du SDA, sera estimée par la multiplication de ces trois probabilités. A noter qu'il faudra propager les incertitudes associées aux trois probabilités pour obtenir l'intervalle de confiance de la performance globale (ceci peut être réalisé par bootstrap paramétrique).

Pour plus de précision sur les analyses et les modèles utilisés, des scripts d'exemple sont disponibles sur le site MAPE.

4. Tailles d'échantillon et précision des estimations

L'incertitude sur les paramètres estimés est directement liée à la taille de l'échantillon (nombre de fois où la variable à expliquer a été mesurée). Il existe de fait une relation mathématique entre précision d'une estimation et taille d'échantillon utilisé pour l'estimer. Plus l'échantillon est grand, plus l'incertitude est faible et plus les valeurs des paramètres estimés sont proches de la réalité.

De fait, il est possible d'obtenir des estimations très différentes de la valeur réelle d'un paramètre en se basant sur des échantillons de tailles diverses. Ce biais d'estimation est exacerbé lorsque l'échantillon est de petite taille. En effet, on sait, par le théorème central limite, que plus la taille de l'échantillon augmente, plus la valeur estimée a de chance de se rapprocher de la valeur réelle. À l'inverse, la valeur estimée du paramètre peut être très éloignée de la valeur réelle lorsque l'échantillon est réduit.

Ce théorème central limite est aujourd'hui largement utilisé pour calculer l'intervalle de confiance (à un seuil donné) d'une estimation sachant sa taille (et les caractéristiques de la population statistique étudiée). La figure 2 présente les valeurs estimées de la probabilité de détection/classification combinée avant une certaine distance et les intervalles de confiance associés à 95% attendus pour différentes valeurs réelles du paramètre et différentes tailles d'échantillon (voir aussi l'annexe 1). Ces graphiques montrent clairement que la largeur de l'intervalle de confiance décroît en suivant une forme exponentielle négative, ce qui corrobore la théorie.

Cette figure illustre aussi qu'au-delà d'une certaine taille d'échantillon (associée à un effort de mesure donné), la prise en considération de données supplémentaires ne permet pas d'améliorer sensiblement la précision. Ces figures peuvent être utilisées pour définir le nombre de trajets à relever pour obtenir un degré de précision voulu. L'examen de la figure 2 suggère qu'une taille d'échantillon d'environ 100 trajets permet d'obtenir une bonne précision de l'estimation. Cependant, nos tests sur le terrain en 2022 ont montré que le nombre de trajets d'une espèce cible sur un parc donné pouvait être très variable selon les parcs. Parfois, ces 100 trajets seront obtenus en quelques jours de terrain. Parfois, il en faudra des dizaines. Dans cette dernière situation, le coût d'application du protocole devient prohibitif. Il est dans ce cas possible de faire des choix de protocoles qui doivent être discutés avec les services de l'Etat. En effet, la précision d'une estimation n'est pas un critère scientifique objectif. Il correspond au degré de risque que l'on est prêt à prendre (probabilité de se tromper en disant que la vraie valeur du paramètre d'intérêt est comprise dans l'intervalle de confiance de l'estimation). Il est, de fait, possible de choisir un degré de précision moindre (intervalle de confiance à 80% par exemple) et

donc réduire le nombre de trajets échantillonnés nécessaire. Il est aussi possible d'utiliser des trajets d'une autre espèce proche en taille/forme et type de vol.

A noter que la précision de l'évaluation des capacités de détection dépend elle-même de la probabilité de détection. En effet, une estimation réalisée avec un même nombre de trajets sera moins précise pour un SDA qui a une probabilité de détection plus faible (Annexe 1).

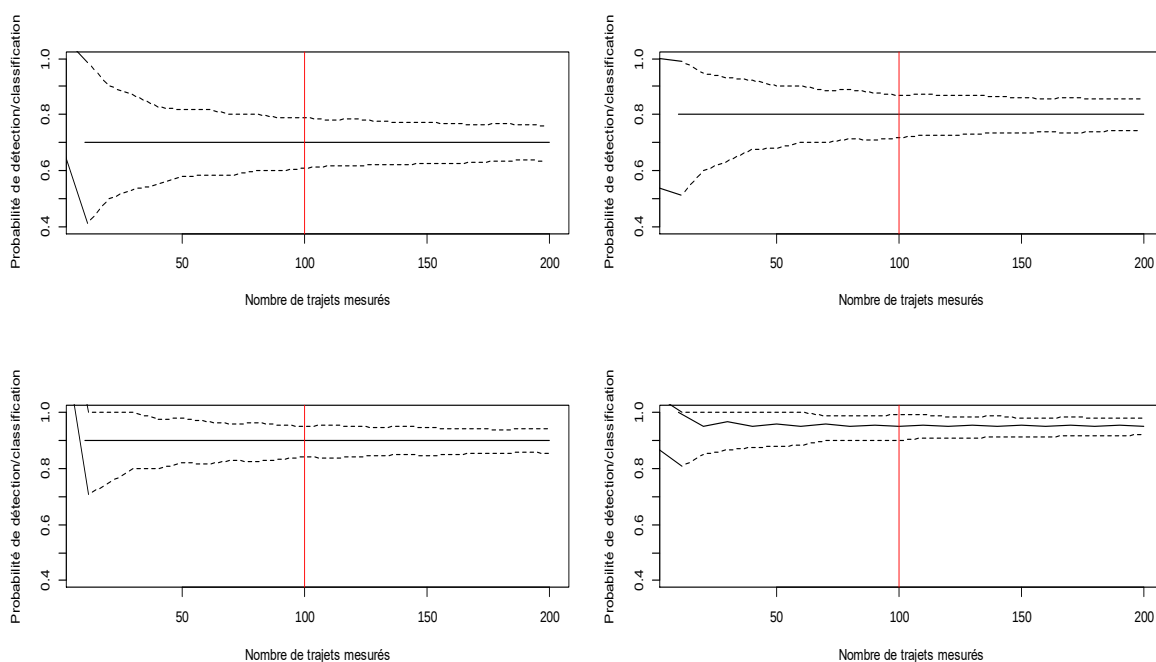


Figure 2 : Estimation moyenne et son intervalle à 95% de la probabilité de détection/classification combinée avant une certaine distance, selon différents efforts de relevé de trajets et différentes valeurs réelles de cette probabilité (0,70 en haut à gauche ; 0,80 en haut à droite ; 0,90 en bas à gauche et 0,95 en bas à droite)

Références

Ballester C., Chateaugiron T., Duriez O. et Besnard A. (2023). Mise en œuvre des protocoles d'évaluation des systèmes de détection-réaction dans des sites tests (WP4P2). Rapport de MAPE aux financeurs. 32 pages.

Borkenhagen, K., Corman, A. M., & Garthe, S. (2018). Estimating flight heights of seabirds using optical rangefinders and GPS data loggers: a methodological comparison. *Marine Biology*, 165(1), 1-7.

Cole, E. L., Waggitt, J. J., Hedenstrom, A., Piano, M., Holton, M. D., Börger, L., & Shepard, E. L. (2019). The Ornithodolite as a tool to quantify animal space use and habitat selection: a case study with birds diving in tidal waters. *Integrative zoology*, 14(1), 4-16.

Darras, K., Furnas, B., Fitriawan, I., Mulyani, Y., & Tschardt, T. (2018). Estimating bird detection distances in sound recordings for standardizing detection ranges and distance sampling. *Methods in Ecology and Evolution*, 9(9), 1928-1938.

McClure CJW, Martison L, Allison TD (2018) Automated monitoring for birds in flight_ Proof of concept with eagles at a wind power facility. *Biological Conservation*:9

Therkildsen, O. R., Balsby, T. J., Kjeldsen, J. P., Nielsen, R. D., Bladt, J., & Fox, A. D. (2021). Changes in flight paths of large-bodied birds after construction of large terrestrial wind turbines. *Journal of Environmental Management*, 290, 112647.

Annexe 1 - Intervalles de confiance à 95% obtenus en fonction du nombre de trajectoires utilisé et de la probabilité de détection du SDA

Nombre de trajectoires	Probabilité de détection	IC 95% inférieur	IC 95% supérieur
10	0,5	0,2	0,8
20	0,5	0,3	0,7
30	0,5	0,33	0,67
40	0,5	0,35	0,65
50	0,5	0,36	0,64
60	0,5	0,38	0,62
70	0,5	0,39	0,61
80	0,5	0,39	0,61
90	0,5	0,4	0,6
100	0,5	0,4	0,6
110	0,5	0,41	0,59
120	0,5	0,41	0,59
130	0,5	0,42	0,58
140	0,5	0,42	0,59
150	0,5	0,42	0,58
160	0,5	0,42	0,58
170	0,5	0,42	0,58
180	0,5	0,43	0,57
190	0,5	0,43	0,57
200	0,5	0,43	0,57

Nombre de trajectoires	Probabilité de détection	IC 95% inférieur	IC 95% supérieur
10	0,7	0,4	1
20	0,7	0,5	0,9
30	0,7	0,53	0,87
40	0,7	0,55	0,83
50	0,7	0,56	0,82
60	0,7	0,58	0,82
70	0,7	0,59	0,8
80	0,7	0,6	0,8
90	0,7	0,6	0,79
100	0,7	0,61	0,79
110	0,7	0,61	0,78
120	0,7	0,62	0,78
130	0,7	0,62	0,78
140	0,7	0,62	0,78
150	0,7	0,63	0,77
160	0,7	0,63	0,77
170	0,7	0,63	0,77
180	0,7	0,63	0,77
190	0,7	0,63	0,76
200	0,7	0,64	0,77

Nombre de trajectoires	Probabilité de détection	IC 95% inférieur	IC 95% supérieur
10	0,8	0,5	1
20	0,8	0,6	0,95
30	0,8	0,63	0,93
40	0,8	0,68	0,93
50	0,8	0,68	0,9
60	0,8	0,7	0,9
70	0,8	0,7	0,89
80	0,8	0,71	0,89
90	0,8	0,71	0,88
100	0,8	0,72	0,87
110	0,8	0,72	0,87
120	0,8	0,73	0,87
130	0,8	0,73	0,87
140	0,8	0,73	0,86
150	0,8	0,73	0,86
160	0,8	0,74	0,86
170	0,8	0,74	0,86
180	0,8	0,74	0,86
190	0,8	0,74	0,86
200	0,8	0,75	0,86

Nombre de trajectoires	Probabilité de détection	IC 95% inférieur	IC 95% supérieur
10	0,9	0,7	1
20	0,9	0,75	1
30	0,9	0,77	1
40	0,9	0,8	0,98
50	0,9	0,8	0,98
60	0,9	0,82	0,97
70	0,9	0,83	0,96
80	0,9	0,83	0,96
90	0,9	0,83	0,96
100	0,9	0,84	0,96
110	0,9	0,84	0,95
120	0,9	0,84	0,95
130	0,9	0,85	0,95
140	0,9	0,85	0,95
150	0,9	0,85	0,95
160	0,9	0,85	0,94
170	0,9	0,85	0,94
180	0,9	0,86	0,94
190	0,9	0,86	0,94
200	0,9	0,86	0,94