

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

## **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.*

Julie Fluhr, Olivier Duriez<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, Univ. Montpellier, CNRS UMR5175, EPHE-PSL University, IRD, Univ. Paul Valéry Montpellier 3, Montpellier, France — équipe de recherche du projet MAPE (Mortalité Aviaire dans les Parcs Éoliens terrestres en exploitations)

# Table des matières

1. Introduction .....	3
2. Vol et vitesses de vol des oiseaux.....	5
2.1. Morphologie de l'oiseau.....	5
2.2. Types de vol.....	7
2.3. Conditions environnementales.....	7
2.4. Motivations et contexte de vol .....	8
2.5. Mesurer les vitesses de vol des oiseaux .....	9
2.5.1. Le radar.....	9
2.5.2. L'ornithodite .....	9
2.5.3. La télémétrie satellitaire .....	9
2.6. Prédire les vitesses de vol des oiseaux .....	10
2.7. Types de vitesse de vol mesurée.....	10
3. Conclusion.....	12
4. Références citées.....	13

# 1. Introduction

L'impact environnemental des parcs éoliens en exploitation sur les oiseaux s'observe principalement à deux niveaux : la perte d'habitat naturel liée à l'évitement des installations par les individus, effarouchés ou dérangés (Marques et al. 2014), et la mortalité par collision avec les rotors ou les mâts des turbines (de Lucas et al. 2007 ; Köppel 2017). Dans le cadre des politiques de protection de l'environnement, les exploitants de parcs ont pour obligation d'éviter et de réduire ces impacts, en particulier lorsqu'ils affectent des espèces protégées.

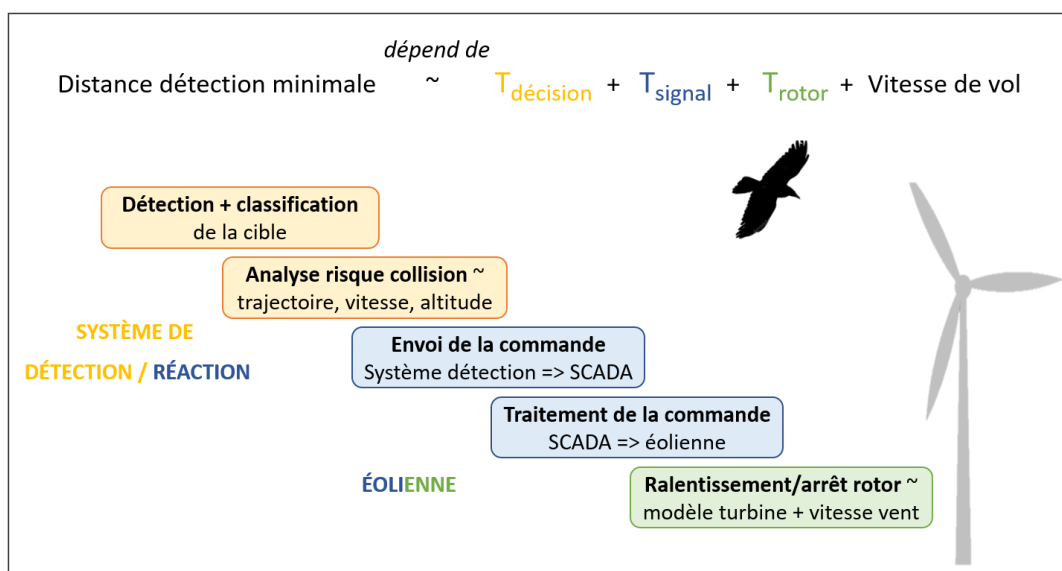
Pour répondre à l'injonction réglementaire de réduire les risques de collision, les exploitants de parcs éoliens peuvent installer des dispositifs d'asservissement des machines de type « détection-réaction » automatisés. Ces derniers reposent sur la détection à distance et l'identification de 'cibles' en déplacement plus ou moins rapide, avec des trajectoires variables. La détection de ces cibles repose sur différentes technologies dont les radars et les caméras optiques (voire thermiques), possiblement couplées (Tomé et al. 2017; McClure et al. 2018). Dès lors qu'une cible est détectée et que sa trajectoire est analysée par le système, plusieurs types d'action peuvent être déclenchés : effaroucher (à l'aide de stimuli auditifs en général) pour modifier la trajectoire de l'individu et l'éloigner des turbines, ralentir/arrêter les turbines pour minimiser le risque de collision, ou ne rien faire. L'efficacité du système repose donc sur une combinaison entre la distance de détection de l'oiseau, sa vitesse de déplacement, et la durée de mise en œuvre de l'action choisie (effarouchement ou ralentissement/arrêt des rotors). Ainsi, plus l'oiseau est détecté à une grande distance et moins il vole vite, plus il y aura de temps pour mettre en œuvre une action adéquate pour éviter la collision. Par exemple, si un oiseau est détecté à 200 m et qu'il vole à  $20 \text{ m.s}^{-1}$ , il couvrira la distance à la turbine en 10 secondes. S'il est détecté à 400 m, il couvrira cette distance en 20 secondes, doublant ainsi le temps de réaction pour activer l'effarouchement ou ralentir/arrêter les rotors. Par ailleurs, si le temps de ralentissement/arrêt du rotor est de 30 secondes, il faudrait pouvoir détecter à 600 m un oiseau volant à  $20 \text{ m.s}^{-1}$  pour agir efficacement.

Comme mentionné précédemment, l'efficacité des systèmes de détection-réaction dépend notamment de la distance à laquelle la cible est détectée. Dans le cas du lancement de la commande pour ralentir/stopper les turbines, la distance de détection minimale d'un oiseau (distance seuil à partir de laquelle la cible est détectée à temps pour éviter une collision) dépend elle-même de plusieurs paramètres (Fig. 1) :

- $T_{\text{décision}}$  : le temps (durée) de prise de décision inhérent au système. Il s'agit de la durée nécessaire pour détecter, classer et identifier la cible, et pour estimer le risque de collision en fonction de différents paramètres tels que la trajectoire et la vitesse de déplacement de la cible.

- $T_{\text{signal}}$ : la durée de traitement et d'envoi de la commande de ralentissement/arrêt du rotor entre le système de détection-réaction et le système de contrôle et d'acquisition de données (SCADA), puis entre le SCADA et la turbine.
- $T_{\text{rotor}}$  = la durée de ralentissement/arrêt du rotor
- $V_{\text{cible}}$  = la vitesse de déplacement de la cible
- $L_{\text{rotor}}$  = la longueur du rotor

**Figure n°1 : Paramètres déterminant la distance de détection minimale d'un oiseau en vol pour assurer que l'éolienne soit arrêtée (ou à faible vitesse de rotation résiduelle) lorsque l'oiseau est au niveau de la zone de danger.**



D'après l'équation proposée dans un rapport de KNE (centre de compétences pour la protection de la nature et la transition énergétique, Allemagne) publié en 2019 :

$$\text{Distance de détection} = [(T_{\text{décision}} + T_{\text{signal}} + T_{\text{rotor}}) * V_{\text{cible}}] + L_{\text{rotor}}$$

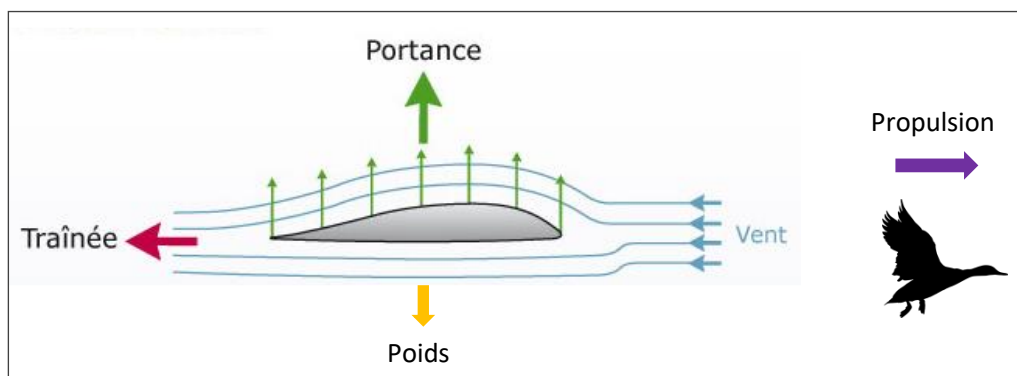
Le travail mené dans le cadre du workpackage WP3 R3 a pour objectifs d'évaluer les durées de ralentissement du rotor ( $T_{\text{rotor}}$ ) et de recueillir et de calculer les vitesses de vol de différentes espèces d'oiseaux dans des contextes environnementaux variés. La présente note est une synthèse des connaissances relatives au vol et aux vitesses de vol des oiseaux.

## 2. Vol et vitesses de vol des oiseaux

### 2.1. Morphologie de l'oiseau

La vitesse de vol d'un oiseau dépend de nombreux paramètres dont la morphologie de l'espèce. Des travaux ont ainsi montré que la vitesse de vol est positivement corrélée à la masse de l'oiseau (Norberg 1995; Alerstam et al. 2007). Les lois aérodynamiques permettent d'expliquer cette relation. En effet un oiseau ne peut se maintenir en l'air qu'à la condition que sa portance soit supérieure à son poids (Fig. 2).

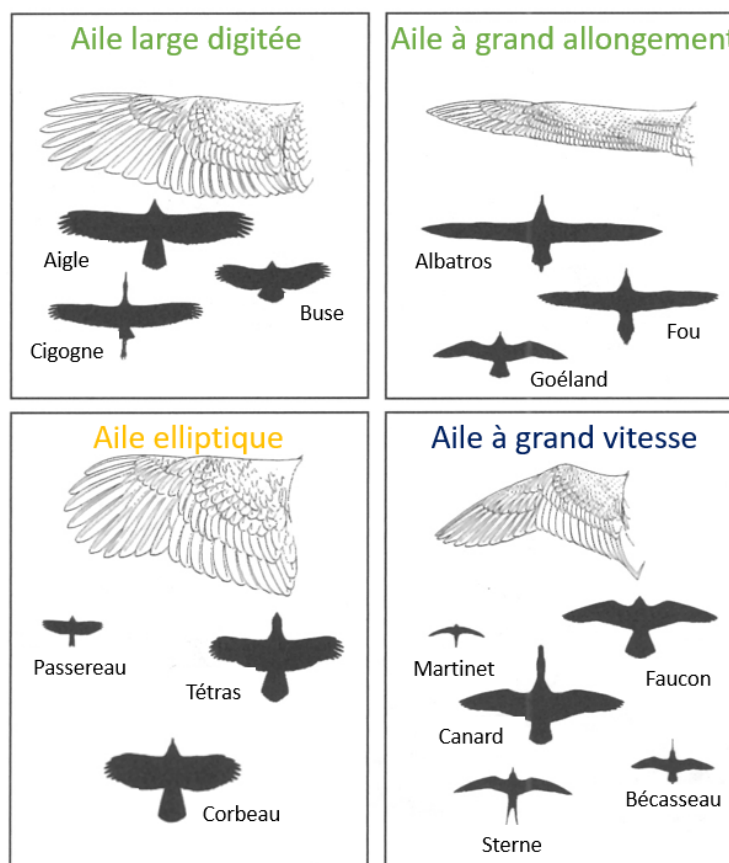
**Figure n°2 : Forces aérodynamiques s'exerçant sur un oiseau en vol. La propulsion est une force horizontale parallèle à la trajectoire de l'oiseau. La traînée est une force qui s'oppose au mouvement de l'oiseau dans l'air, c'est-à-dire à sa propulsion. La portance est une force qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement et qui compense le poids de l'oiseau (attraction terrestre) et le maintient en l'air.**



De ce fait, plus un oiseau est lourd, plus il doit voler à une vitesse élevée pour que le flux d'air autour de ses ailes génère une portance suffisante pour compenser son poids. Aussi, les espèces les plus lourdes, comme les canards et les cigognes, présentent des vitesses de vol moyennes relativement élevées, de l'ordre de 15 à 25 m.s<sup>-1</sup>, par opposition aux espèces les plus légères comme les passereaux qui volent à des vitesses moyennes plus faibles, de l'ordre de 6 à 12 m.s<sup>-1</sup>. La vitesse de vol dépend donc de la morphologie de l'espèce mais peut également varier entre individus d'une même espèce. Un oiseau alourdi par un repas, des réserves de graisse ou un œuf en formation volera nécessairement à une vitesse plus élevée qu'un individu à jeun ou amaigri (Klaassen et al. 2000).

La charge alaire (rapport entre la masse de l'individu et la surface de ses ailes) ainsi que l'allongement des ailes (« *aspect ratio* » en anglais) conditionnent également la vitesse de vol des oiseaux (Bowlin & Wikelski 2008; Rader et al. 2020). Certaines espèces, à l'instar des canards, des martinets et des faucons, présentent des ailes de forme « triangulaire », permettant d'atteindre de grandes vitesses, alors que d'autres espèces comme les passereaux et les corvidés possèdent des ailes de forme « elliptique », permettant une meilleure manœuvrabilité, au détriment de la vitesse (Fig. 3). Il existe également des profils d'aile à grand allongement, caractéristiques des goélands, fous et albatros, et des ailes larges et digitées typiques des grands rapaces (e.g. aigles, vautours) et autres grands planeurs (e.g. cigognes, pélicans ; Fig. 3). Ces deux dernières morphologies alaires permettent à ces espèces d'atteindre des vitesses de vol relativement élevées en pratiquant le vol plané à un faible coût énergétique (Duriez et al. 2014).

**Figure n°3 : Les différents types d'ailes chez les espèces d'oiseaux. L'allongement des ailes ou « aspect ratio » est un paramètre morphologique qui conditionne la vitesse de vol d'un oiseau.**



## 2.2. Types de vol

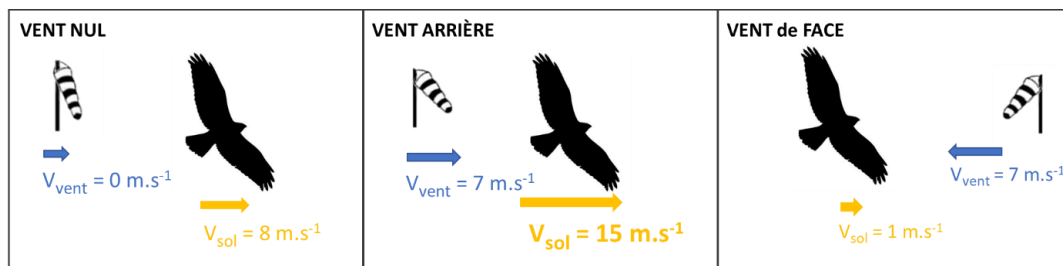
La vitesse de déplacement d'un oiseau dépend également de son type de vol, dont les fréquences d'utilisation sont variables entre les espèces (Brown 1963; Pennycuick 2008b). Deux grands types de vol peuvent être ainsi observés : le vol battu et le vol plané, avec ou sans déplacement horizontal. En ce qui concerne le vol battu avec déplacement horizontal, on peut distinguer le vol battu continu caractéristique des canards, oies et limicoles, et le vol intermittent typique des passereaux et des martinets. Le vol intermittent correspond à l'alternance de séquences de vol battu et de phases en vol plané (ailes ouvertes) ou en vol balistique (ailes fermées et plaquées au corps). D'autres espèces, comme la majorité des grands rapaces, les cigognes et les grues, pratiquent, quant à elles, le vol plané (ailes déployées) avec déplacement horizontal. On peut également rencontrer des espèces qui pratiquent le vol battu stationnaire, c'est-à-dire sans déplacement horizontal ni vertical. C'est le cas des faucons crécerelles (*Falco tinnunculus*) ou des colibris (famille des Trochilidae) lorsqu'ils recherchent leurs proies. Les grands planeurs mentionnés précédemment pratiquent quant à eux un vol plané (appelé aussi « vol à voile ») qu'on pourrait qualifier de « stationnaire » s'il est observé à grande distance car le déplacement en latitude/longitude (dans un plan horizontal) cesse pour être temporairement remplacé par un déplacement vertical. Ainsi, en profitant de l'élévation de masses d'air chaudes (ascendances thermiques) ou de masses d'air qui rencontrent un relief (ascendances orographiques), ces grands planeurs gagnent de la hauteur (déplacement vertical) afin de se déplacer ensuite à un moindre coût énergétique en vol plané (avec déplacement horizontal ici). En résumé, on peut rencontrer des espèces qui pratiquent le vol battu ou plané sans déplacement horizontal, autrement dit avec des vitesses relatives au sol très faibles voire nulles, et d'autres qui opèrent des vols avec déplacement horizontal dont les vitesses peuvent varier en fonction de l'espèce, du type de vol (battu ou plané), et d'autres paramètres présentés ci-dessous.

## 2.3. Conditions environnementales

La vitesse de vol d'un oiseau varie également en fonction des conditions environnementales, notamment la vitesse et la direction du vent (Spear & Ainley 1997; Liechti & Bruderer 1998; Liechti 2006; Safi et al. 2013). A titre d'exemple, si un oiseau vole à  $8 \text{ m.s}^{-1}$  en l'absence de vent, alors en présence d'un vent arrière de  $7 \text{ m.s}^{-1}$  sa vitesse relative au sol augmentera et sera de l'ordre de  $15 \text{ m.s}^{-1}$ , et inversement par vent de face (Fig. 4). Les conditions thermiques influencent également la vitesse de vol des oiseaux, corroborant l'hypothèse des paysages énergétiques proposée par Wilson et ses collaborateurs (2012). Plusieurs travaux ont en effet montré que la disponibilité et l'utilisation d'ascendances thermiques par les grands planeurs – à l'instar des vautours – augmente leur vitesse de vol et réduit leur temps de migration (Dodge et al. 2014; Duerr et al. 2015). La vitesse de vol d'un oiseau est également influencée par l'altitude de vol puisque la densité de l'air diminue avec l'altitude (Pennycuick 1975, 2001). Plus précisément, les modèles aérodynamiques prédisent une

augmentation de la vitesse de vol avec l'altitude, proportionnelle à  $(\rho_0/\rho)^{1/2}$ , où  $\rho_0$  est la densité de l'air au niveau de la mer et  $\rho$  est la densité de l'air à l'altitude de vol de l'oiseau. Cet effet altitudinal correspond à une augmentation d'environ 5 % de la vitesse de vol par palier de 1000 mètres d'augmentation de l'altitude, à condition que l'oiseau puisse générer la puissance nécessaire pour atteindre et maintenir ces vitesses de vol plus élevées (Pennycuick 1978; Hedenström et al. 2002; Hedenström 2003). Plusieurs travaux montrent en effet que les oiseaux ajustent leur comportement de vol aux changements de densité de l'air avec l'altitude, avec notamment une augmentation de leur vitesse de vol en migration à haute altitude (Schmaljohann & Liechti 2009; Hawkes et al. 2011; Sherub et al. 2016).

**Figure n°4 : Influence de la vitesse ( $V_{vent}$ ) et de la direction du vent sur la vitesse relative au sol ( $V_{sol}$ ) de l'oiseau.**



## 2.4. Motivations et contexte de vol

Malgré des contraintes morphologiques et environnementales, un oiseau dispose d'une certaine marge de manœuvre pour ajuster sa vitesse de vol. En fonction du contexte, il peut ainsi décider de voler plus vite ou moins vite par rapport à la vitesse optimale (qui minimise ses dépenses énergétiques) en modifiant la forme de ses ailes ou l'inclinaison de son corps (Lentink et al. 2007; Horvitz et al. 2014). Ainsi, la vitesse choisie lors de vols locaux peut être différente de la vitesse en vols migratoires puisque les besoins et la motivation de l'oiseau ne sont pas les mêmes (Harel et al. 2016). Dans un contexte de recherche alimentaire, l'individu peut choisir de voler plus lentement et/ou de manière plus sinueuse de façon à mieux détecter ses proies (Pinaud 2008), ou au contraire choisir de pratiquer des vols rectilignes très rapides lors de l'acte de chasse par exemple (par exemple le faucon pèlerin (*Falco peregrinus*) capable d'atteindre une vitesse de piqué de 320 km.h<sup>-1</sup> (Ponitz et al. 2014)). En période de reproduction, certaines espèces adoptent aussi des comportements et des vitesses de vol spécifiques au cours de leurs parades nuptiales (e.g. les bécasses en croule, les aigles festonnant, les alouettes chantant en vol stationnaire). En période



migratoire, la motivation de l'oiseau est de voler vite et loin, en minimisant le temps de migration ou la consommation énergétique (Alerstam 1991). Des travaux ont également montré que les oiseaux adoptent des vitesses de vol plus rapides lors des migrations printanières de façon à atteindre les premiers les meilleurs sites de reproduction (Hedenström & Alerstam 1998; Nilsson et al. 2013).

Compte tenu des nombreux facteurs influençant la vitesse de vol d'un oiseau, il existe une grande variabilité des vitesses de vol entre les espèces, entre les individus d'une même espèce et en fonction du contexte. Aussi, il est très important de prendre en compte cette gamme des vitesses de vol possibles pour une espèce donnée, de façon à déterminer sa distance de détection minimale pour réduire son risque de collision avec les turbines.

## **2.5. Mesurer les vitesses de vol des oiseaux**

Trois outils sont largement utilisés pour suivre les déplacements d'oiseaux et mesurer différents paramètres tels que la trajectoire, l'altitude et la vitesse de vol : le radar, l'ornithodolite et la télémétrie satellitaire.

### **2.5.1. Le radar**

Basé sur le principe de la réception d'échos, le radar permet de suivre les déplacements d'oiseaux de jour comme de nuit. Il a surtout été utilisé en période migratoire (Bruderer 1997, 1999; Bruderer & Boldt 2001; Bruderer 2003). Le radar présente également l'avantage de pouvoir détecter des cibles en mouvement à plusieurs kilomètres, et en fonction de sa performance, d'identifier des groupes d'espèces voire des espèces grâce à la fréquence des battements d'ailes (Bruderer et al. 2010).

### **2.5.2. L'ornithodolite**

Paire de jumelles avec télémètre laser, inclinomètre et compas magnétique numérique intégrés, l'ornithodolite permet d'enregistrer en temps réel les positions d'un oiseau en vol dans un plan tri-dimensionnel (Pennycuick & Lighthill 1982). Cet outil portatif est utilisé pour mesurer les vitesses de vol d'oiseaux en vols locaux et migratoires (Pennycuick et al. 2013; Hedenström & Åkesson 2017).

### **2.5.3. La télémétrie satellitaire**

A partir des années 2000, l'avènement de la télémétrie satellitaire a permis de suivre un nombre croissant d'espèces d'oiseaux (de taille de plus en plus réduite) en les équipant de balises Argos puis de récepteurs GPS. Ces systèmes mesurent la position géographique en trois dimensions ainsi que la vitesse de vol instantanée relative au sol (Bridge et al. 2011; Sherub et al. 2017). Contrairement au

radar et à l'ornithodolite, la télémétrie permet d'étudier le comportement de vol de l'oiseau indépendamment de la position de l'observateur. Elle peut se réaliser tout au long de l'année et donc permettre de mesurer les vitesses de vol des individus lors de vols locaux et migratoires.

## 2.6. Prédire les vitesses de vol des oiseaux

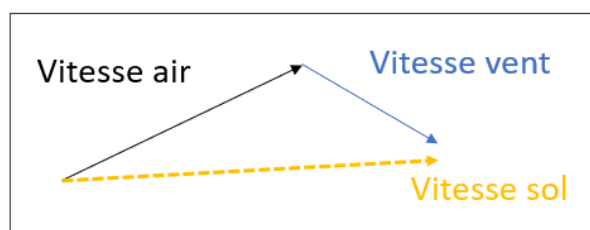
Il est également possible de prédire les vitesses de vol des oiseaux à partir des théories aérodynamiques. Les modèles développés par Pennycuick (1989, 2008b) permettent par exemple de prédire les différentes vitesses de vol d'une espèce en fonction de sa masse, de l'envergure et de la surface de ses ailes (ou de l'allongement des ailes). Pour les espèces qui pratiquent le vol battu, il est possible de prédire la vitesse de vol qui permet à l'oiseau de dépenser le moins d'énergie par unité de temps ( $V_{mp}$  ou « *minimal power speed* » en anglais) et la vitesse qui lui permet d'obtenir le meilleur compromis entre dépenses énergétiques et distance parcourue ( $V_{mr}$  ou « *maximum range speed* » en anglais). Pour les espèces qui pratiquent le vol plané, il est également possible de prédire cette dernière ainsi que la vitesse de vol qui minimise le taux de chute de l'oiseau (autrement dit, qui minimise sa perte d'altitude par unité de distance parcourue ;  $V_{bg}$  ou « *best glide speed* »). Les oiseaux volent généralement à des vitesses proches ou légèrement supérieures à la  $V_{mp}$  (vitesse optimale en termes de dépenses énergétiques), sauf lorsqu'ils doivent maximiser leur distance parcourue au cours de longs vols migratoires, auquel cas des vitesses plus élevées sont nécessaires, de l'ordre de  $V_{mr}$  (Pennycuick 2001).

## 2.7. Types de vitesse de vol mesurée

Quelle que soit la méthode utilisée pour mesurer la vitesse de vol d'un oiseau, l'observation principale sur le terrain est la vitesse relative au sol, c'est-à-dire une mesure de la distance et de la direction du déplacement de l'oiseau en un temps donné, par rapport à la surface de la Terre. Pour comparer les vitesses mesurées sur le terrain aux vitesses prédites par les modèles issus des théories aérodynamiques (modèles de Pennycuick présentés ci-dessus), il est nécessaire de convertir les vitesses relatives au sol en vitesses relatives à l'air. Il est important de noter ici que cette contrainte méthodologique explique la prépondérance des vitesses air rapportées dans les publications scientifiques, notamment dans le cas des études par radar (Bruderer & Boldt 2001; Alerstam et al. 2007)(voir section suivante). La vitesse « vraie » relative à l'air correspond à la vitesse de déplacement de l'oiseau dans la masse d'air (également appelée « vent relatif »), avec pour référentiel l'oiseau en vol, et non plus l'observateur au sol (Pennycuick 2008a). Pour obtenir le vecteur de la vitesse relative à l'air, le vecteur de la vitesse du vent mesuré (vitesse et direction du vent) doit être soustrait vectoriellement du vecteur de la vitesse relative au sol mesurée (Pennycuick 2008a). Cela revient à résoudre le triangle des vitesses (Fig. 5) pour chaque observation de vitesse.

Il est également important de noter que certains auteurs (Bruderer & Boldt 2001; Alerstam et al. 2007 ; Pennycuick et al. 2013) calculent et rapportent dans leurs travaux des vitesses air « équivalentes » ( $EqVa$ ), résultats de la correction des vitesses air « vraies » ( $Va$ ) tel que  $EqVa = Va \sqrt{d/d0}$  avec  $d$  la densité de l'air à l'altitude à laquelle a été mesurée  $Va$ , et  $d0$  la densité de l'air mesurée au niveau de la mer ( $p_0 = 1.226 \text{ km.m}^{-3}$ ). Cette correction permet de comparer les vitesses air des oiseaux en s'affranchissant de l'effet de l'altitude puisque la vitesse de vol augmente à mesure que la densité de l'air diminue en altitude (Pennycuick 1975, 1978, 2001; Hedenström 2003; Schmaljohann & Liechti 2009).

**Figure n°5 : Triangle des (vecteurs) de vitesses : pour obtenir le vecteur de la vitesse relative à l'air, le vecteur de la vitesse du vent mesuré (vitesse et direction du vent) doit être soustrait vectoriellement du vecteur de la vitesse relative au sol mesurée (Pennycuick 2008a).**



Dans l'objectif de déterminer les distances de détection minimales des oiseaux dans le cadre du projet MAPE, c'est la vitesse à laquelle s'approche un oiseau de l'installation éolienne qui importe le plus, autrement dit, sa vitesse relative à un point fixe au sol. Or les types de vitesses rapportées dans les publications scientifiques diffèrent en fonction de la méthode de mesure utilisée. Ce sont généralement des vitesses air « vraies » et/ou « équivalentes » qui sont publiées dans le cas des suivis par radar (e.g. Bruderer & Boldt 2001; Alerstam et al. 2007) et dans les travaux théoriques basés sur les modèles de Pennycuick (2008b), et des vitesses « sol » dans les publications où les oiseaux ont été suivis par télémétrie satellitaire (e.g. Lanzone et al. 2012; Spiegel et al. 2013; Katzner et al. 2015). Aussi, en fonction de la disponibilité des vitesses publiées pour une espèce donnée, seront retenues par ordre de préférence : les vitesses sol, les vitesses air « équivalentes », et enfin les vitesses air « vraies ».

### 3. Conclusion

Les résultats du workpackage WP3R3 permettront de mieux renseigner les constructeurs de dispositifs de détection-réaction quant aux performances à chercher à atteindre en fonction des espèces possiblement rencontrées sur chaque site. Les résultats de ce travail permettront également aux autorités administratives de définir les limites de détection à imposer pour réduire au maximum les risques de collision pour les espèces patrimoniales.

## 4. Références citées

- Alerstam T. 1991. Bird flight and optimal migration. *Trends in Ecology & Evolution* 6:210–215.
- Alerstam T, Rosén M, Bäckman J, Ericson PGP, Hellgren O. 2007. Flight Speeds among Bird Species: Allometric and Phylogenetic Effects. *PLOS Biology* 5:e197.
- Bowlin MS, Wikelski M. 2008. Pointed Wings, Low Wingloading and Calm Air Reduce Migratory Flight Costs in Songbirds. *PLOS ONE* 3:e2154.
- Bridge ES et al. 2011. Technology on the Move: Recent and Forthcoming Innovations for Tracking Migratory Birds. *BioScience* 61:689–698.
- Brown RHJ. 1963. The Flight of Birds. *Biological Reviews* 38:460–489.
- Bruderer B. 1997. The Study of Bird Migration by Radar Part 1: The Technical Basis. *Naturwissenschaften* 84:1–8.
- Bruderer B. 1999. Three decades of tracking radar studies on bird migration in Europe and the Middle East. *Proceedings of international seminar on birds and flight safety in the Middle East Israel* 107-142.
- Bruderer B. 2003. The Radar Window to Bird Migration. Pages 347–358 in P. Berthold, E. Gwinner, and E. Sonnenschein, editors. *Avian Migration*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Bruderer B, Boldt A. 2001. Flight characteristics of birds: I. radar measurements of speeds. *Ibis* 143:178–204.
- Bruderer B, Peter D, Boldt A, Liechti F. 2010. Wing-beat characteristics of birds recorded with tracking radar and cine camera. *Ibis* 152:272–291.
- de Lucas M, Janss GFE, Ferrer M. 2007. *Birds and wind farms. Risk assessment and mitigation*. Quercus. Madrid.
- Dodge S et al. 2014. Environmental drivers of variability in the movement ecology of turkey vultures (*Cathartes aura*) in North and South America. *Phil. Trans. R. Soc. B* 369:20130195.
- Duerr AE, Miller TA, Lanzone M, Brandes D, Cooper J, O'Malley K, Maisonneuve C, Tremblay JA, Katzner T. 2015. Flight response of slope-soaring birds to seasonal variation in thermal generation. *Functional Ecology* 29:779–790.
- Duriez O, Kato A, Tromp C, Dell'Omo G, Vyssotski AL, Sarrazin F, Ropert-Coudert Y. 2014. How Cheap Is Soaring Flight in Raptors? A Preliminary Investigation in Freely-Flying Vultures. *PLOS ONE* 9:e84887.

- Harel R, Duriez Olivier, Spiegel Orr, Fluhr Julie, Horvitz Nir, Getz Wayne M., Bouten Willem, Sarrazin François, Hatzofe Ohad, Nathan Ran. 2016. Decision-making by a soaring bird: time, energy and risk considerations at different spatio-temporal scales. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 371:20150397.
- Hawkes LA et al. 2011. The trans-Himalayan flights of bar-headed geese (*Anser indicus*). *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108:9516–9519.
- Hedenström A. 2003. Twenty-Three Testable Predictions About Bird Flight. Pages 563–582 in P. Berthold, E. Gwinner, and E. Sonnenschein, editors. *Avian Migration*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Hedenström A, Åkesson S. 2017. Adaptive airspeed adjustment and compensation for wind drift in the common swift: differences between day and night. *Animal Behaviour* 127:117–123.
- Hedenström A, Alerstam T. 1998. How Fast Can Birds Migrate? *Journal of Avian Biology* 29:424–432.
- Hedenström A, Alerstam T, Green M, Gudmundsson GA. 2002. Adaptive variation of airspeed in relation to wind, altitude and climb rate by migrating birds in the Arctic. *Behavioral Ecology and Sociobiology* 52:308–317.
- Horvitz N, Sapir N, Liechti F, Avissar R, Mahrer I, Nathan R. 2014. The gliding speed of migrating birds: slow and safe or fast and risky? *Ecology Letters* 17:670–679.
- Katzner TE, Turk PJ, Duerr AE, Miller TA, Lanzone MJ, Cooper JL, Brandes D, Tremblay JA, Lemaître J. 2015. Use of multiple modes of flight subsidy by a soaring terrestrial bird, the golden eagle *Aquila chrysaetos*, when on migration. *Journal of the Royal Society Interface* 12.
- Klaassen M, Kvist A, Lindström Å. 2000. Flight Costs and Fuel Composition of a Bird Migrating in a Wind Tunnel. *The Condor* 102:444–451.
- Köppel J. 2017. *Wind Energy and Wildlife Interactions: Presentations from the CWW2015 Conference*. Springer.
- Lanzone MJ et al. 2012. Flight responses by a migratory soaring raptor to changing meteorological conditions. *Biology Letters* 8:710–713.
- Lentink D, Müller UK, Stamhuis EJ, de Kat R, van Gestel W, Veldhuis LLM, Henningsson P, Hedenström A, Videler JJ, van Leeuwen JL. 2007. How swifts control their glide performance with morphing wings. *Nature* 446:1082–1085. Nature Publishing Group.
- Liechti F. 2006. Birds: blowin' by the wind? *Journal of Ornithology* 147:202–211.

- Liechti F, Bruderer B. 1998. The Relevance of Wind for Optimal Migration Theory. *Journal of Avian Biology* 29:561–568. [Nordic Society Oikos, Wiley].
- Marques AT, Batalha H, Rodrigues S, Costa H, Pereira MJR, Fonseca C, Mascarenhas M, Bernardino J. 2014. Understanding bird collisions at wind farms: An updated review on the causes and possible mitigation strategies. *Biological Conservation* 179:40–52.
- McClure CJW, Martinson L, Allison TD. 2018. Automated monitoring for birds in flight: Proof of concept with eagles at a wind power facility. *Biological Conservation* 224:26–33.
- Nilsson C, Klaassen RHG, Alerstam T. 2013. Differences in Speed and Duration of Bird Migration between Spring and Autumn. *The American Naturalist* 181:837–845. The University of Chicago Press.
- Norberg UM. 1995. How a Long Tail and Changes in Mass and Wing Shape Affect the Cost for Flight in Animals. *Functional Ecology* 9:48–54.
- Pennycuik CJ. 1975. Mechanics of Flight. *Avian Biology* 5:1–73. Academic Press.
- Pennycuik CJ. 1978. Fifteen Testable Predictions about Bird Flight. *Oikos* 30:165–176.
- Pennycuik CJ. 2001. Speeds and wingbeat frequencies of migrating birds compared with calculated benchmarks. *Journal of Experimental Biology* 204:3283–3294.
- Pennycuik CJ. 2008a. Chapter 15 Theory as the Basis For Observation. Pages 409–441 *Theoretical Ecology Series*. Academic Press.
- Pennycuik CJ. 2008b. *Modelling the Flying Bird*. Elsevier.
- Pennycuik CJ, Åkesson S, Hedenström A. 2013. Air speeds of migrating birds observed by ornithodolite and compared with predictions from flight theory. *Journal of The Royal Society Interface* 10:20130419. Royal Society.
- Pennycuik CJ (Colin J). 1989. *Bird flight performance*. Oxford University Press.
- Pennycuik CJ, Lighthill SJ. 1982. The ornithodolite: An instrument for collecting large samples of bird speed measurements. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences* 300:61–73. Royal Society.
- Pinaud D. 2008. Quantifying search effort of moving animals at several spatial scales using first-passage time analysis: effect of the structure of environment and tracking systems. *Journal of Applied Ecology* 45:91–99.
- Ponitz B, Schmitz A, Fischer D, Bleckmann H, Brücker C. 2014. Diving-Flight Aerodynamics of a Peregrine Falcon (*Falco peregrinus*). *PLOS One* 9:e86506.

Rader JA, Hedrick TL, He Y, Waldrop LD. 2020. Functional Morphology of Gliding Flight II. Morphology Follows Predictions of Gliding Performance. *Integrative and Comparative Biology* 60:1297–1308.

Safi K et al. 2013. Flying with the wind: scale dependency of speed and direction measurements in modelling wind support in avian flight. *Movement Ecology* 1:4.

Schmaljohann H, Liechti F. 2009. Adjustments of wingbeat frequency and air speed to air density in free-flying migratory birds. *Journal of Experimental Biology* 212:3633–3642.

Sherub S, Bohrer G, Wikelski M, Weinzierl R. 2016. Behavioural adaptations to flight into thin air. *Biology Letters* 12:20160432. Royal Society.

Sherub S, Fiedler W, Duriez O, Wikelski M. 2017. Bio-logging, new technologies to study conservation physiology on the move: a case study on annual survival of Himalayan vultures. *Journal of Comparative Physiology A* 203:531–542.

Spear LB, Ainley DG. 1997. Flight speed of seabirds in relation to wind speed and direction. *Ibis* 139:234–251.

Spiegel O, Getz WM, Nathan R. 2013. Factors Influencing Foraging Search Efficiency: Why Do Scarce Lappet-Faced Vultures Outperform Ubiquitous White-Backed Vultures? *The American Naturalist* 181:E102–E115.

Tomé R, Canário F, Leitão AH, Pires N, Repas M. 2017. Radar Assisted Shutdown on Demand Ensures Zero Soaring Bird Mortality at a Wind Farm Located in a Migratory Flyway. Pages 119–133 in J. Köppel, editor. *Wind Energy and Wildlife Interactions: Presentations from the CWW2015 Conference*. Springer International Publishing, Cham.

Wilson RP, Quintana F, Hobson VJ. 2012. Construction of energy landscapes can clarify the movement and distribution of foraging animals. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 279:975–980.