

Carte suisse des conflits potentiels entre l'énergie éolienne et les oiseaux: partie oiseaux migrateurs

Rapport explicatif, mise à jour 2013

Felix Liechti
Jérôme Guélat
Silke Bauer
María Mateos
Susanna Komenda-
Zehnder



Rapport établi sur mandat
de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)



vogelwarte.ch

Impressum

Carte suisse des conflits potentiels entre l'énergie éolienne et les oiseaux : partie oiseaux migrateurs. Rapport explicatif. Mise à jour 2013

Rapport établi sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Auteurs

Felix Liechti, Jérôme Guélat, Silke Bauer, Maria Mateos & Susanna Komenda-Zehnder

Traduction

H.-D. Wibaut

Photos (page de titre)

Hahnenmoospass (en haut): Bruno Bruderer; Windpark Smøla, Norwegen (en bas): Valère Martin

Proposition de citation

Felix Liechti, Jérôme Guélat, Silke Bauer, Maria Mateos & Susanna Komenda-Zehnder (2012): Carte suisse des conflits potentiels entre l'énergie éolienne et les oiseaux : partie oiseaux migrateurs. Rapport explicatif. Mise à jour 2013. Station ornithologique suisse, Sempach.

Contact

Felix Liechti, Station ornithologique suisse, CH-6204 Sempach

Tél.: 041 462 97 00, 041 462 97 84 (direct), fax: 041 462 97 10, felix.liechti@vogelwarte.ch

© 2017, Station ornithologique suisse de Sempach

Le présent rapport ne peut faire l'objet d'une publication intégrale ou partielle sans l'accord de la Station ornithologique suisse de Sempach. La présente étude a été réalisée sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement OFEV. Seul le mandataire porte la responsabilité de son contenu.

Inhaltsverzeichnis

Résumé	4
Zusammenfassung	4
1. Introduction	5
1.1 Concentrations observées d'oiseaux migrateurs	5
1.1.1 Migration d'automne	5
1.1.2 Migration de printemps	5
1.2 Objectifs	6
2. Processus	6
2.1 Bases	6
2.2 Trajectoire de vol	7
2.3 Topographie	7
2.4 Altitude de vol	8
2.5 Intégration de la trajectoire de vol et de la topographie	9
2.6 Simulation informatique et paramétrage	10
3. Modélisation	11
3.1 Paramètres du modèle	11
3.1.1 Itérations	11
3.1.2 Nombre d'oiseaux par carré initial	11
3.1.3 Altitude initiale des oiseaux	11
3.1.4 Taux de chute des oiseaux	12
3.1.5 Comportement en vol par rapport à la topographie	13
3.1.6 Incidence du vent sur le comportement en vol	15
3.2 Données comparatives	17
3.2.1 Lune17	
3.2.2 Appréciation des experts	17
3.2.3 Mesures radar	19
3.3 Application des paramètres du modèle à la migration de printemps	20
4. Résultats	21
4.1 Analyse de sensibilité	21
4.2 Validation de la modélisation d'automne	22
4.3 Modélisation de printemps	25
4.4 Carte suisse des conflits potentiels entre l'énergie éolienne et les oiseaux : partie oiseaux migrateurs	27
5. Pertinence de la carte	30
5.1 Catégories de risque	30
5.2 Interprétation des résultats	31
6. Mesures	33
6.1 Surveillance de la migration	33
6.2 Taux de collision et calcul de la valeur seuil	34

7. Perspectives d'avenir	38
8. Bibliographie	39
Annexe A	40
Annexe B	43

Résumé

Dans le cadre de l'utilisation des énergies renouvelables, un nombre croissant de parcs éoliens sont prévus et réalisés en Suisse. Pour les oiseaux migrateurs, les éoliennes peuvent constituer des obstacles mortels. Il est donc important de disposer d'une vue d'ensemble des risques éventuels qu'ils encourent. Le présent rapport se base sur les derniers acquis pour montrer quelles densités d'oiseaux migrateurs sont à prévoir en Suisse, et où. Les oiseaux migrateurs sont partout présents en Suisse, leur concentration variant fortement en fonction de la saison, de la topographie et du vent. En nous fondant sur les connaissances relatives au comportement des oiseaux en vol, qui migrent en battant activement des ailes (majoritairement des oiseaux chanteurs, qui représentent plus de 90% du volume de migration), nous avons mis au point un modèle informatique qui nous a permis de calculer les densités migratoires dans l'ensemble de la Suisse. D'une part, une comparaison avec les résultats de la recherche menée depuis de nombreuses années en la matière a permis d'ajuster les données observées ; d'autre part, des observations au radar sur le terrain ont servi à affecter des densités migratoires effectives aux résultats relatifs issus du modèle. Il en a résulté une carte, qui présente les densités migratoires moyennes estimées en automne et au printemps.

Enfin, ces densités graduelles ont été interprétées en tant que risques de collision et réparties en trois catégories. Nous avons renoncé à définir des zones d'exclusion, mais recommandons plutôt, pour les zones à conflit potentiel, un système de surveillance permettant de mettre hors service les éoliennes en période de forte intensité migratoire. Il importera de procéder à un comptage effectif des victimes, pour vérifier les estimations disponibles.

Le document présent contient des modifications rédactionnelles et la carte de conflits mise à jour en 2013.

Zusammenfassung

Im Rahmen der Nutzung erneuerbarer Energieformen werden in der Schweiz zunehmend Windenergieanlagen geplant und gebaut. Für Zugvögel können Windenergieanlagen tödliche Hindernisse darstellen. Deshalb ist es wichtig, über ein Gesamtbild der möglichen Risiken zu verfügen. Dieser Bericht zeigt anhand der aktuellen Erkenntnisse wo in der Schweiz mit welchen Vogelzugdichten zu rechnen ist. Ziehende Vögel treten in der Schweiz flächendeckend auf, wobei deren Konzentration stark von der Jahreszeit, der Topografie und von den Windverhältnissen abhängen. Basierend auf dem Wissen über das Flugverhalten von Vögeln, die durch aktiven Flügelschlag ziehen (mehrheitlich Singvögel, die über 90 % des Zugvolumens darstellen), entwickelten wir ein Computermodell. Damit wurden Zugdichten über der ganzen Schweiz berechnet. Durch den Vergleich mit den Resultaten aus der langjährigen Zugforschung wurde das Modell einerseits an die beobachteten Daten angeglichen. Andererseits wurden Feldbeobachtungen mit Radar genutzt, um den relativen Resultaten aus dem Modell effektive Zugdichten zuzuordnen. Daraus resultierte eine Karte, welche die geschätzten mittleren Zugdichten im Herbst und Frühling darstellt.

Diese graduellen Zugdichten wurden schlussendlich als Kollisionsrisiken interpretiert und in drei Kategorien eingeteilt. Auf eine Ausscheidung von Ausschlussgebieten wurde verzichtet. Stattdessen empfehlen wir für potenzielle Konfliktgebiete ein Überwachungssystem, welches ermöglicht, die Windenergieanlagen kurzfristig während den Zeiten hoher Zugintensität abzuschalten. Effektive Schlagopferzählungen sind nötig, um die hier vorliegenden Berechnungen zu überprüfen.

Das vorliegende Dokument enthält sowohl redaktionelle Änderungen wie auch die 2013 aktualisierte Version der Konfliktpotenzialkarte.

1. Introduction

Mode de production d'énergie renouvelable importante aujourd'hui, les parcs éoliens sont en passe de connaître une forte extension en Suisse comme en Europe. On sait que les parcs éoliens peuvent constituer un obstacle pour les oiseaux migrateurs, mais on ignore encore précisément leur incidence sur l'évolution de l'avifaune. Pour certains grands oiseaux, les préjudices sont connus ; pour la grande majorité des oiseaux migrateurs de taille petite et moyenne, les acquis définitifs font encore défaut. Les incidences à redouter d'un seul parc éolien ne devraient pas être graves, mais il est encore difficile de savoir comment le cumul de centaines (en Suisse) et de dizaines de milliers d'éoliennes (en Europe) installées le long des routes migratoires se répercuteront sur l'évolution des populations d'oiseaux migrateurs.

1.1 Concentrations observées d'oiseaux migrateurs

La migration des oiseaux est un phénomène qui s'observe presque tout au long de l'année. Les mouvements migratoires se concentrent toutefois principalement sur le printemps et l'automne. Durant ces périodes, la migration se concentre en outre sur quelques jours et nuits propices, dont la survenance est fortement tributaire de l'évolution météorologique. Le déroulement de la migration dans l'espace et l'altitude de vol sont en grande partie déterminés par la topographie régionale et locale de même que par le vent (Bruderer 1996, Liechti et al. 1996a, 1996b, Zehnder et al. 2001).

1.1.1 Migration d'automne

La Suisse compte plusieurs sites traditionnels d'observation de la migration d'automne. Ces sites sont connus pour le nombre parfois spectaculaire d'oiseaux de passage : Gurnigel (BE), col de Hahnenmoos (BE), Col de Jaman (VD), Col de Bretolet (VS) et Ulmethöchi (BL), p. ex. Sur certains de ces sites, par conséquent, des oiseaux sont, chaque année, systématiquement capturés et bagués. Ils se distinguent par le fait que la migration se concentre localement dans une vallée en entonnoir orientée NE-SO et que les oiseaux sont généralement contraints de gagner de la hauteur au prix d'une ascension raide. Il en résulte une densification facilement observable de la migration, avant tout au niveau de la vallée. Les mesures radar et les observations lunaires ont toutefois révélé qu'une part importante de la migration se déroule de nuit et qu'elle s'effectue sur un large front aussi bien le jour que la nuit et souvent à une haute altitude (Bruderer & Liechti 1990, 1998, 2004, Liechti et al. 1996a, p. ex.). L'ensemble des résultats (sites traditionnels d'observation des migrations diurnes compris) révèlent très nettement dans quelle mesure le déroulement de la migration est influencé par les conditions météorologiques. Les observateurs expérimentés savent ainsi pertinemment dans quelles conditions il est opportun de se rendre à un point d'observation. Les aires de repos connues se situent la plus souvent au bord des lacs, là où des oiseaux sont régulièrement capturés pour le baguage (Bolle di Magadino (TI), p. ex.). Selon une estimation approximative, le volume de la migration d'automne en Suisse s'élève, selon l'année, à 50–100 millions d'oiseaux. Les observations de phénomènes isolés indiquent que, en l'espace d'une seule nuit, 2 à 3 millions d'oiseaux peuvent survoler le Plateau suisse sur un large front (Liechti et al. 1996).

1.1.2 Migration de printemps

Les connaissances sont plus lacunaires en ce qui concerne la migration de printemps, car elle est moins spectaculaire et généralement plus rapide que celle d'automne. Nous ne connaissons pas de points de concentration traditionnels pour l'observation de la migration diurne. On ne bague des oiseaux qu'au Bolle di Magadino (TI), car c'est aussi une aire de repos importante pour eux au printemps. Le déroulement est tout aussi fortement déterminé par les conditions météorologiques au printemps (Liechti et al. 1996b). Comme en automne, de fortes concentrations migratoires peuvent, certains jours ou certaines nuits, résulter d'incursions prolongées du froid. Globalement, nous estimons

que le volume migratoire de printemps représente près de la moitié de la migration d'automne ; autrement dit, selon l'année, 20 à 70 millions d'oiseaux migrateurs devraient survoler la Suisse au printemps. Il importe à vrai dire de ne pas oublier que les pertes éventuelles d'oiseaux durant la migration de printemps ont une plus grave incidence sur les populations d'oiseaux qu'en automne. Ces migrants en route pour leur zone de reproduction constituent la population nicheuse potentielle, et les pertes ont donc une influence directe sur le taux de reproduction de la population. Il s'agit de ce que l'on appelle une mortalité additive. A l'inverse, en automne, les pertes éventuelles concernent des oiseaux qui mourraient peut-être aussi durant l'hiver. On parle donc alors de mortalité partiellement compensatoire.

1.2 Objectifs

Il est possible de désamorcer en grande partie le conflit potentiel entre les parcs éoliens et les oiseaux en parvenant à dissocier l'exploitation de l'énergie éolienne et l'activité migratoire des oiseaux. Comme la migration aviaire s'observe pratiquement à l'échelle nationale, il est très difficile de procéder à une séparation spatiale entre migration et exploitation de l'énergie éolienne. Il est possible d'obtenir une meilleure dissociation sur l'axe temporel, si l'on connaît le lieu et l'heure des fortes concentrations d'oiseaux migrateurs. Comme les rotors à l'arrêt représentent un risque de collision nettement moindre pour les oiseaux migrateurs, il est possible d'obtenir une réduction notable du risque potentiel en mettant temporairement hors service certaines éoliennes.

La présente étude a pour objectif de déterminer où des intensités migratoires faibles, moyennes et élevées sont à prévoir en Suisse. En l'absence d'observations intégrales du territoire, il a été décidé d'élaborer un modèle SIG qui simule le déroulement de la migration. Le modèle, basé sur l'observation et le savoir d'experts, n'est pas en mesure de reproduire en détail la situation ni sur le plan spatial ni temporel, mais il fournit une vue d'ensemble des intensités migratoires à prévoir en Suisse en moyenne annuelle. Les parcs éoliens n'affectant que les couches inférieures de l'espace aérien (< 200 m), le modèle doit aussi prendre en compte l'altitude de vol des oiseaux migrateurs.

2. Processus

2.1 Bases

La migration des oiseaux s'effectue en principe sur un large front. La *topographie* en général et l'*orographie* en particulier ont pour effet que la migration est déviée et canalisée le cas échéant vers certaines vallées et certains cols. L'ampleur de ce phénomène dépend, d'une part, du *comportement en vol* des oiseaux et, d'autre part, des *conditions météorologiques*. En se fondant sur ces composantes, le présent modèle calcule la répartition géographique de l'intensité migratoire en Suisse. En ce qui concerne le comportement en vol, le modèle s'est basé sur un oiseau migrateur se déplaçant à coup de battements d'ailes actifs et non tributaire d'ascendants thermiques ou autres. Ces adeptes du vol battu représentent la grande majorité des oiseaux migrateurs (> 95%).

Concernant l'élaboration du modèle, plusieurs facteurs ont été paramétrés (cf. ci-après) et les résultats des diverses simulations ont été constamment comparés avec les acquis de la recherche menée depuis des décennies par la Station ornithologique suisse en matière de migration (Validation, chap. 3). Ainsi, le modèle informatique a encore été amélioré et les paramètres utilisés ont pu être ajustés de façon à ce que les résultats se rapprochent en permanence des observations faites sur le terrain.

Pour la simulation de la migration aviaire, nous avons utilisé un modèle basé sur une grille, permettant de décrire des systèmes dynamiques, spatialement discrets. Cela signifie que l'état d'une cellule au moment $t+1$ dépend de l'état des cellules d'un voisinage déterminé ainsi que de son propre état au

moment t . Dans notre modèle, une cellule correspond à un carré kilométrique, ce qui se reflète aussi dans les représentations graphiques, où une cellule correspond à un pixel.

Toutes les opérations de simulation avaient pour condition préalable l'hypothèse selon laquelle les oiseaux migrateurs partaient d'une même ligne, répartis de manière homogène. Compte tenu d'une altitude de départ et du comportement en vol en fonction du vent et de la topographie, une évaluation a déterminé comment les oiseaux issus d'un carré se répartissaient dans les carrés voisins. Ce calcul est répété pour l'ensemble des carrés jusqu'à l'obtention d'un résultat stable. Le nombre d'itérations a été défini de façon à obtenir des densités à l'échelle nationale. L'intensité migratoire qui en a résulté par carré est représentée selon un codage de couleurs. L'échelle des couleurs reflète l'intensité migratoire relative, qui ne peut être quantifiée que d'après des valeurs empiriques et des mesures individuelles (cf. Validation).

2.2 Trajectoire de vol

La migration à travers l'Europe occidentale ne s'effectue pas directement du nord au sud, mais du nord-est au sud-ouest. La trajectoire moyenne de vol et la dispersion sont influencées par la direction et la force des vents dominants. Pour la modélisation des distributions de directions, nous avons utilisé les résultats d'observations radar depuis un site présentant une faible influence topographique et situé dans le sud de l'Allemagne (Bruderer & Liechti 1990). Bruderer & Liechti (1990) ont distingué, du point de vue des oiseaux migrateurs (direction de base : 225°), quatre catégories de directions du vent : vent contraire, vent arrière, vent latéral de NO et vent latéral de SE. La force du vent a été répartie en trois catégories : < 5 m/s, 5 à 10 m/s et > 10 m/s. Il en résulte douze distributions de directions possibles (annexe A). En fonction de ces distributions, le modèle a calculé selon quelle probabilité, dans une situation de vent donnée, un oiseau migrateur passera dans une cellule voisine, autrement dit comment les oiseaux de la cellule d'origine se répartissent entre les différentes cellules voisines.

2.3 Topographie

L'influence de la topographie sur la migration aviaire s'évalue en premier lieu en Suisse par le biais de l'orographie (structure du relief). Afin de quantifier cette influence pour le modèle, nous avons pris en considération à chaque fois la différence d'altitude entre la cellule d'origine et les cellules voisines lors de la répartition des oiseaux dans ces cellules.

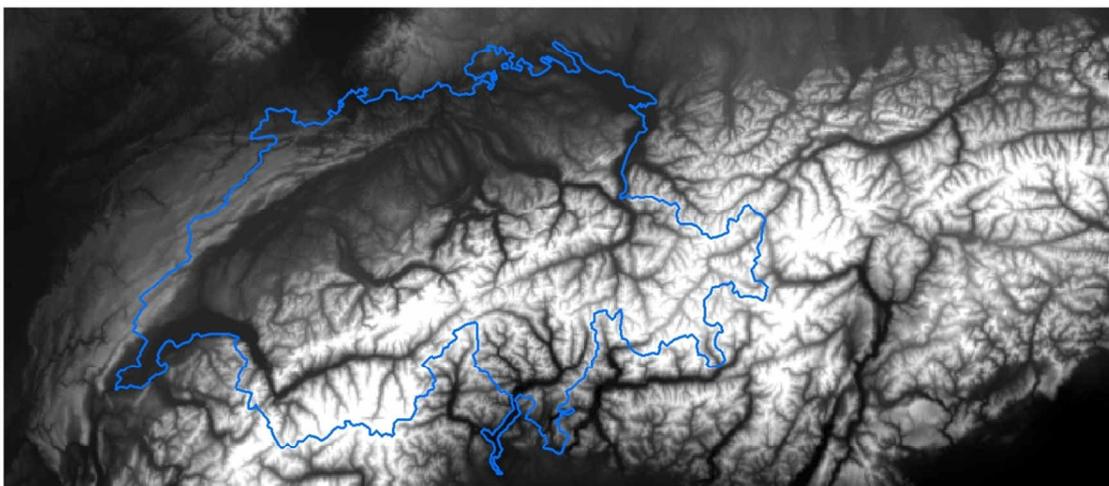


Fig. 1. Carte topographique utilisée comme matrice de base pour la simulation (USGS 1996).

Notre matrice de base correspond au modèle d'altitude de la Suisse (et des environs) dans une résolution de 1 km² (fig.1). L'intégration des différences d'altitude d'un carré à l'autre s'effectue par le calcul d'une couche lissée d'altitudes, assortie de « moving windows » (fig. 2). A partir d'une cellule définie (« focal pixel »), le modèle calcule à quelles hauteurs topographiques les oiseaux doivent s'attendre en passant dans la cellule suivante (valeur focale). Comme le modèle comporte huit trajectoires de vol discrètes possibles (N, NE, E, SE, S, SO, O, NO), il en résulte à chaque fois huit couches altitudinales.

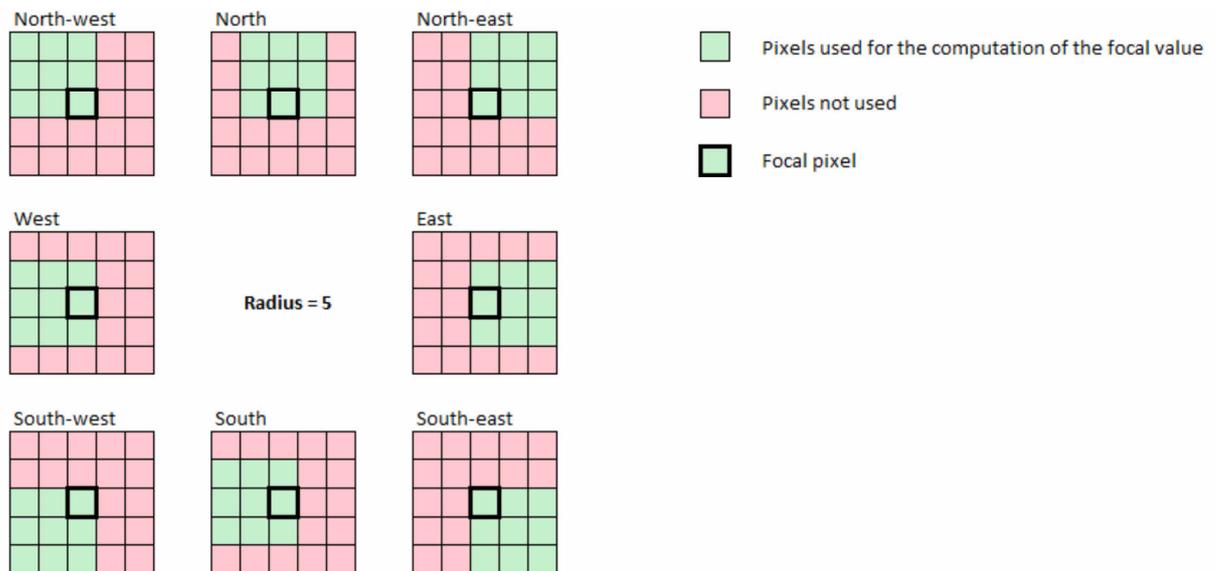


Fig. 2. Méthode dite de « moving window » pour le calcul de la différence d'altitude par rapport à la hauteur de vol actuelle, en fonction de la trajectoire de vol. A titre d'exemple : une « moving window » avec une extension de 5 km.

Pour calculer la valeur focale issue des carrés intégrés, il est possible d'utiliser, par exemple, la valeur moyenne, le minimum, le maximum ou le 3^{ème} quartile. En outre, la taille de la « moving window » (rayon) peut être agrandie à $5 + 4x$, x devant être un nombre entier.

Le calcul des couches d'altitude a pour but de refléter le comportement en vol des oiseaux par rapport à la topographie. En même temps, la taille de la « moving window » correspond pour ainsi dire au point de vue des oiseaux et détermine jusqu'à quelle distance les variations d'altitude influent sur le comportement ultérieur en vol. La méthode de calcul (valeur moyenne, 3^{ème} quartile etc.) présente les différences d'altitude qui importent pour le comportement ultérieur de l'oiseau ; autrement dit, dans quelle mesure les valeurs extrêmes se répercutent sur les décisions concernant la direction à prendre. Nous avons vérifié quels paramètres du calcul des couches d'altitude reproduisaient le mieux la réalité, en comparant les cartes de densité obtenues avec les données issues des observations et le savoir des experts (Bruderer 1996, Liechti et al. 1996a, 1996b).

2.4 Altitude de vol

Tous les oiseaux sont affectés à une altitude initiale (« initial height »). L'altitude de vol se calcule ensuite en additionnant l'altitude topographique de la cellule d'origine et l'altitude de l'oiseau au-dessus du sol. Pour chaque cellule, le modèle calcule à chaque étape l'altitude moyenne de vol à partir des altitudes de vol des oiseaux qui entrent dans le carré. S'il en résulte une altitude de vol moyenne inférieure à l'altitude topographique, l'altitude de vol est utilisée pour la suite des calculs.

A chaque passage dans le carré suivant, les oiseaux doivent décider s'ils maintiennent leur altitude de vol ou bien s'ils doivent monter ou descendre. Un relevé topographique dans la trajectoire de vol privilégiée (« moving windows ») contraint les oiseaux soit à monter ou à changer de direction (cf. chap. 2.5). En cas de hauteur suffisante au-dessus du sol, après le franchissement d'une crête par exemple, le paramètre du modèle « flydown » permet aux oiseaux de descendre (flydown = 10 signifie p. ex. que les oiseaux descendront de 10 m sur 1 km).

Au terme d'une simulation, l'altitude moyenne de vol de toutes les cellules est enregistrée. Elle peut ensuite faire l'objet d'une représentation cartographique.

2.5 Intégration de la trajectoire de vol et de la topographie

Les distributions de directions précisent dans quelles directions les oiseaux volent dans des conditions de vent déterminées. La représentation s'effectue au moyen d'une matrice de 3x3 (fig.3), qui indique les parts de répartition des oiseaux depuis leur cellule actuelle vers les cellules voisines (R_{1-8}). Sur la base de l'altitude vol moyenne dans la cellule actuelle, le modèle calcule la différence d'altitude (T_{1-8}) par rapport aux carrés voisins (en fonction de la définition de la « moving window », cf. 2.3) et la présente également sous forme d'une matrice de 3x3. Pour obtenir la distribution résultant de ces deux distributions, il convient de modéliser le comportement en vol, afin de déterminer la différence d'altitude requise pour que les oiseaux contournent un obstacle plutôt que de le survoler. La pondération de cette différence d'altitude s'effectue au moyen d'une fonction sigmoïde, qui établit dans quelle mesure les oiseaux dévient de la trajectoire de vol prédéfinie en cas d'accroissement de la différence d'altitude. Les proportions d'oiseaux volant dans une certaine direction sont multipliées par la pondération des différences d'altitudes et ensuite standardisées.

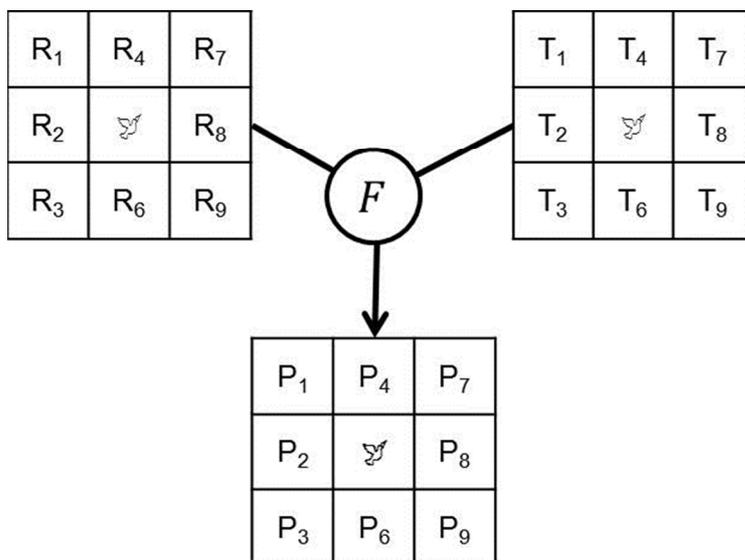


Fig. 3. A partir de la distribution des directions R_{1-8} et en fonction des couches d'altitude T_{1-8} , qui reflètent la topographie, le modèle calcule à l'aide d'une fonction F dans quelles proportions les oiseaux se répartissent entre les huit carrés voisins d'un carré initial déterminé.

La fonction sigmoïde (fig. 4) est définie par le paramètre « a », qui détermine la pente de la courbe, et le paramètre b, qui définit la situation du point d'inflexion. Le paramètre « b » correspond à la différence d'altitude à laquelle 50% des oiseaux ne sont plus disposés à monter et à survoler l'obstacle.

Par rapport au comportement des oiseaux en vol, l'élévation du paramètre « a » a pour effet de réduire la zone dans laquelle une partie des oiseaux prennent de l'altitude et une autre partie contour-

nant l'obstacle. On n'observe de plus en plus que l'un ou l'autre des comportements. L'élévation du paramètre « b » a pour effet que les oiseaux prennent de l'altitude au lieu de contourner l'obstacle, même en cas de grandes différences d'altitude. La comparaison des cartes de densité simulées et des données issues des observations permet de vérifier quelles valeurs de a et de b reproduisent le mieux la réalité (cf. chap. 3 Validation).

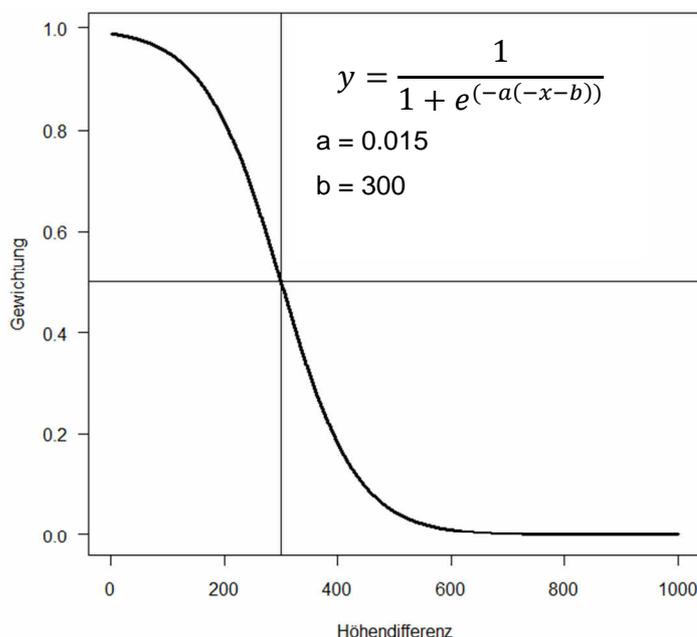


Fig. 4. Exemple d'une fonction sigmoïde permettant de calculer l'influence de la topographie sur la trajectoire de vol. La valeur y indique dans quelle mesure une certaine trajectoire est pondérée en fonction de la différence d'altitude entre l'altitude moyenne de vol et l'altitude topographique dans le carré de la trajectoire de vol.

2.6 Simulation informatique et paramétrage

La simulation a été programmée en R (Version 2.13.1, R Development Core Team 2011, packages raster and rgdal). Les paramètres testés dans la simulation sont présentés à l'annexe B.

Le code R génère des cartes de densité, visualisées ensuite dans ArcGIS (ArcGIS Desktop 10 Service pack 2, 1999–2010 ESRI Inc.).

Tab. 1. Paramètres susceptibles d'être manipulés dans le code R de la simulation informatique.

Désignation	Signification	Valeurs testées	Description
niter	Nombre d'itérations	200, 300, 400, 500, 700, 1000	Chap. 2.1
birdNb	Nombre d'oiseaux par carré initial	100	Chap. 2.1
fun	Fonction pour le calcul des « moving windows »	max, mean, quartile3	Chap. 2.2
rad	Taille des « moving windows »	13, 21, 33	Chap. 2.2
directionWeights	Distribution des directions	cf. annexe A	Chap. 2.3
InitialHeight	Altitude initiale des oiseaux	0, 50, 100, 200, 500, 1500	Chap. 2.4
flydown	Taux de chute des oiseaux	0, 10, 50	Chap. 2.4
aSig	Pente de la fonction sigmoïde	0,01, 0,004, 0,006, 0,007, 0,008	Chap. 2.5
bSig	Point d'inflexion de la fonction sigmoïde	100, 200, 300, 400	Chap. 2.5

3. Modélisation

Les simulations ont été effectuées avec différentes combinaisons de paramètres (selon tab. 1). Les cartes de densité obtenues ont été soumises à un examen critique, consistant à les comparer avec les résultats de la recherche scientifique, notamment les cartes de migration de Bruderer (1996) et les conclusions de la campagne d'observations lunaires (Liechti et al. 1996a, 1996b). En outre, les mesures radar effectuées sur cinq sites différents au cours d'une période de migration d'automne ont servi à convertir les valeurs relatives en intensités migratoires absolues.

La validation du modèle a ensuite été effectuée sur la base des densités de migration d'automne, car les données comparatives disponibles se limitent en grande partie à cette période migratoire. Il est plausible de supposer que les oiseaux migrant au printemps présentent un comportement en vol similaire, mais avec des préférences inversées en matière de trajectoire. Pour la modélisation de la migration de printemps, nous utilisons donc les mêmes modèles de paramètre qu'en automne à l'exception de la trajectoire de vol. Nous établissons le bilan global en combinant les migrations d'automne et de printemps.

3.1 Paramètres du modèle

3.1.1 Itérations

Dans notre modèle, tous les oiseaux partent au même moment depuis la bordure septentrionale de la Suisse et survolent la zone étudiée selon des étapes de 1 km² par répétition de la procédure de calcul. Dans toutes les conditions envisageables, 700 répétitions ont suffi pour tous les carrés de la grille contiennent une valeur de densité (`niter <- 700`). Un nombre inférieur d'étapes ne permet pas aux calculs de couvrir l'ensemble de la Suisse. Un nombre supérieur n'est pas nécessaire, car les autres valeurs de densité se situent au sud, c'est-à-dire à l'extérieur de la zone étudiée.

3.1.2 Nombre d'oiseaux par carré initial

Sur la ligne de départ, la simulation débute avec un nombre déterminé d'oiseaux par carré. Il s'est avéré que 100 oiseaux par carré suffisaient pour obtenir des valeurs de densité nuancées (`birdNb <- 100`). Un nombre supérieur d'oiseaux ne permettait pas d'améliorer la représentation, sur laquelle nous avons pu porter un jugement purement qualitatif jusqu'à présent. Il n'est toutefois pas exclu que, dans des procédures d'évaluation ultérieures aboutissant à des statistiques définitives, la pertinence soit accrue par une taille d'échantillonnage supérieure.

3.1.3 Altitude initiale des oiseaux

Nous pourrions supposer en principe que les oiseaux partent de leurs aires de repos au nord de la Suisse et donc définir l'altitude initiale = 0. A vrai dire, les oiseaux prennent relativement vite de l'altitude pour rechercher les vents arrière opportuns (Liechti 2006). Nous avons donc étudié l'impact de l'altitude initiale et choisi à cet effet la distribution des directions par vent arrière faible et taux de chute = 0.

La topographie exerce une influence nettement plus forte sur les cartes de densité que l'altitude initiale (fig. 5). L'incidence de l'altitude initiale n'est visible qu'à partir de valeurs supérieures à 1000 m. Les mesures radar montrent cependant que plus de 60% des oiseaux volent à une altitude inférieure à 500 m (Bruderer & Liechti 2004). L'impact de l'altitude initiale est en outre rapidement couvert par un taux de chute > 0, notamment parce que la topographie plate rencontrée après le départ permet de descendre (cf. 3.1.4). Nous avons défini l'altitude initiale en fonction des conditions de vent à 100 m et 200 m.

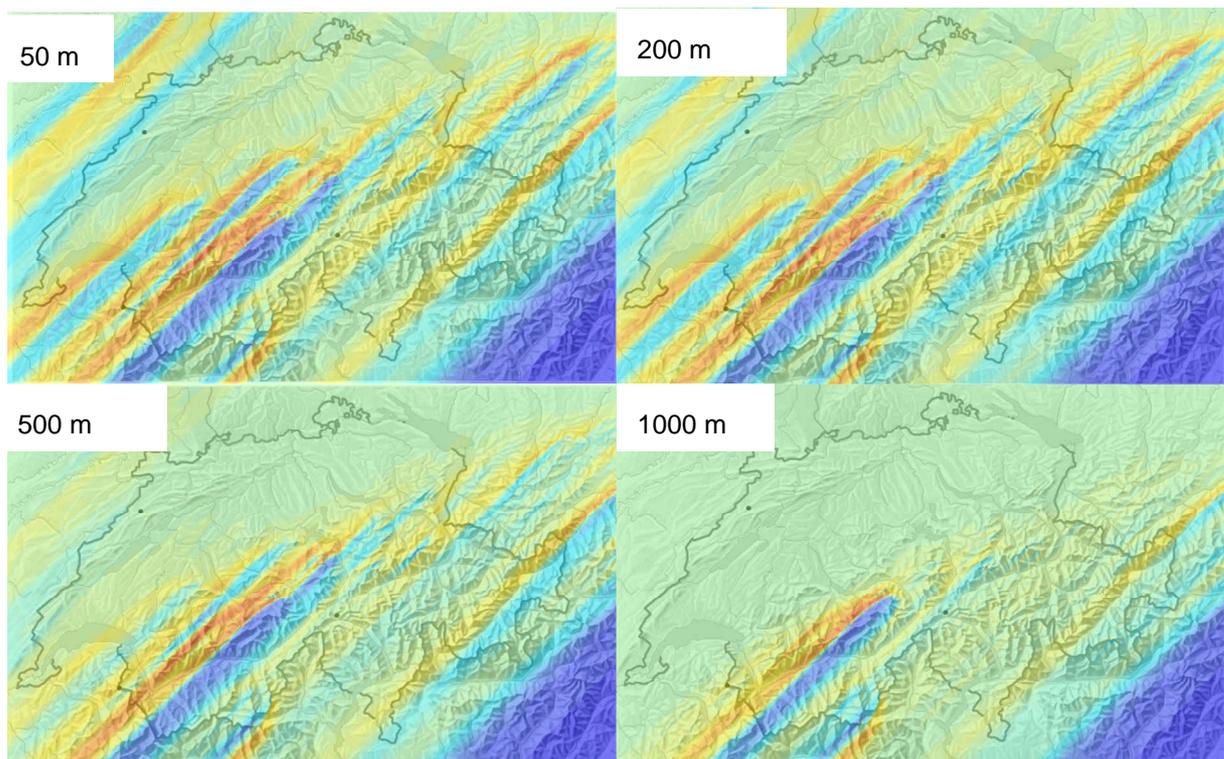


Fig. 5. Impact de l'altitude initiale sur la distribution des densités. La distribution des directions se fonde sur des vents arrière faibles. Le taux de chute a été fixé à 0. La colorisation montre les déciles (valeurs partagés en dix parties égales), bleu foncé 1er décile – rouge 10ème décile).

3.1.4 Taux de chute des oiseaux

Après leur envol, les oiseaux migrateurs recherchent des couches atmosphériques où ils pourront bénéficier de vents arrière à mesure qu'ils prendront de l'altitude (Liechti 2006, Mateos & Liechti 2011). Dès qu'ils ont trouvé des vents favorables, ils se maintiennent à cette altitude de vol. Si les conditions se détériorent en altitude et qu'ils y rencontrent des vents debout, ils redescendent. Les observations radar ont montré que, chez les oiseaux migrateurs, des taux de montée et de chute de 5% font partie d'un comportement normal (Bruderer et al. 1995).

Dans notre simulation, un taux de chute élevé a pour effet que les oiseaux sont davantage canalisés par les montagnes (fig. 6). Dans le cas d'un taux de chute de 1%, on observe déjà des concentrations migratoires élevées dans les vallées de montagne ou autour du Jura. Une augmentation du taux de chute fait que des régions entières ne sont plus survolées. Nous avons opté, dans cette représentation, pour des vents arrière faibles. L'expérience montre que ce sont de bonnes conditions, dans lesquelles les oiseaux migrateurs survolent les crêtes des montagnes à une altitude relativement élevée (Zehnder et al. 2001).

Par vent arrière, les oiseaux migrateurs tendent à maintenir leur altitude de vol, alors qu'ils ont plutôt tendance à descendre en cas de vent contraire. Par conséquent, nous avons choisi, en fonction de la direction du vent simulée, des taux de chute situés entre 0 et 3% (0 - 30 m/km).

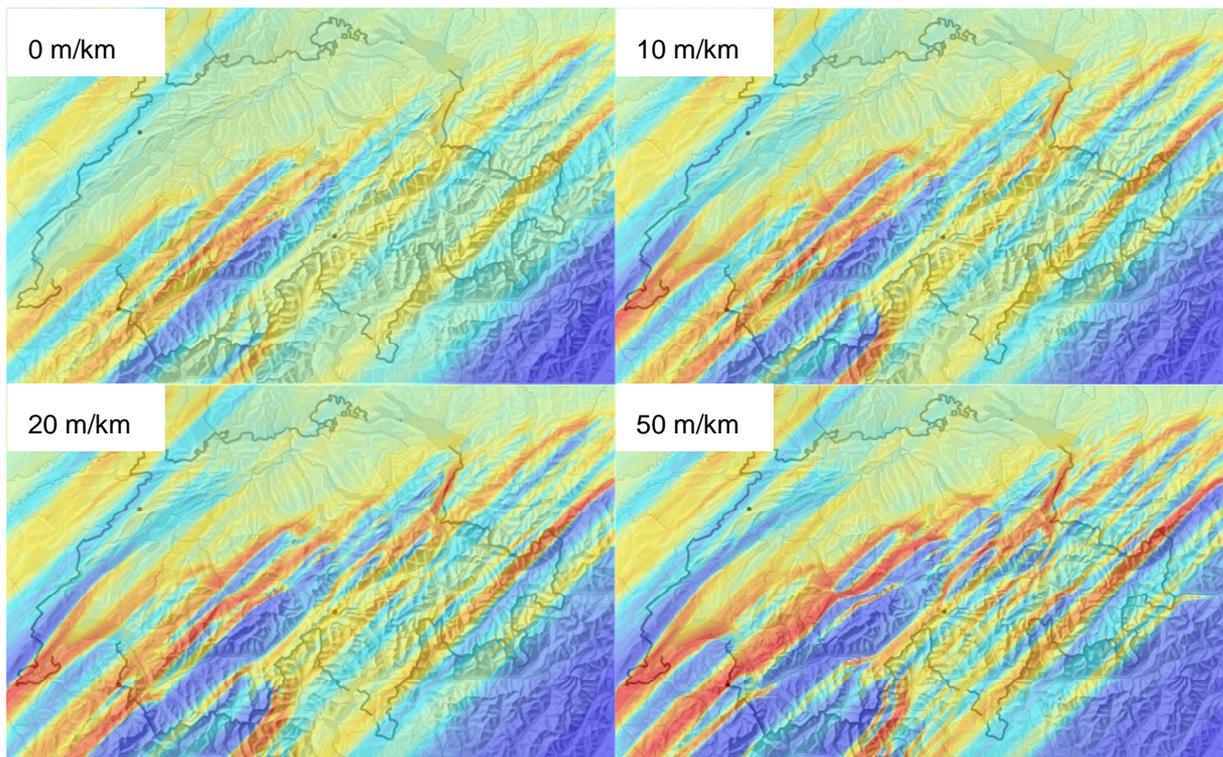


Fig. 6. Impact du taux de chute sur la distribution des densités. Cartes de densité par faible vent arrière. La colorisation montre les déciles (valeurs partagés en dix parties égales), bleu foncé 1er décile – rouge 10ème décile).

3.1.5 Comportement en vol par rapport à la topographie

Les normes de réaction des oiseaux face aux obstacles topographiques sont variables. Elles dépendent du vent et de la visibilité. Notre modèle possède deux modes d'action différents. D'une part, la taille de la « moving window » détermine la distance à laquelle un oiseau réagit face aux obstacles, dans la mesure où l'accroissement de sa taille implique que la topographie est prise en compte de plus loin (cf. 2.2). D'autre part, le comportement vis-à-vis de la topographie est modifié par la courbe sigmoïde (cf. 2.4).

Une « moving window » de 13, par exemple, signifie concrètement que, dans la trajectoire de vol des oiseaux, l'altitude topographique est intégrée dans le comportement ultérieur jusqu'à une distance de 6 km vers N, S, E et O (8,5 km vers SO, NO, NE ou SE) (cf. fig. 2). Dans cet exemple, une seule nouvelle valeur est calculée à partir de 35 valeurs. La méthode de calcul se répercute nettement sur les cartes de densité (fig. 7). Si le maximum est calculé à partir de la « moving window », il en résulte des concentrations extrêmes peu réalistes. La valeur moyenne aboutit exactement à l'opposé, c'est-à-dire à une répartition extrêmement plate, tout aussi irréaliste. Les valeurs les plus prévisibles correspondent à la reproduction utilisée pour le calcul du 3^{ème} quartile. Nous avons donc utilisé cette méthode de calcul pour toutes les cartes de densité, sans le mentionner explicitement.

La « moving window » simule la visibilité des oiseaux. Sur le Plateau, en cas de bonnes conditions météorologiques, une visibilité de 16 km est tout à fait envisageable (moving window = 33). Dans les vallées alpines, une distance plus courte est réaliste, par exemple 6 km (moving window = 13). Tout accroissement de la « moving window » entraîne une plus large répartition de la densité à une plus grande distance des montagnes, car les oiseaux réagissent plus tôt à la présence d'un obstacle (fig. 8). Il n'a toutefois pas été possible, dans le cadre de cette modélisation, de nuancer les distances de visibilité à l'échelle régionale.

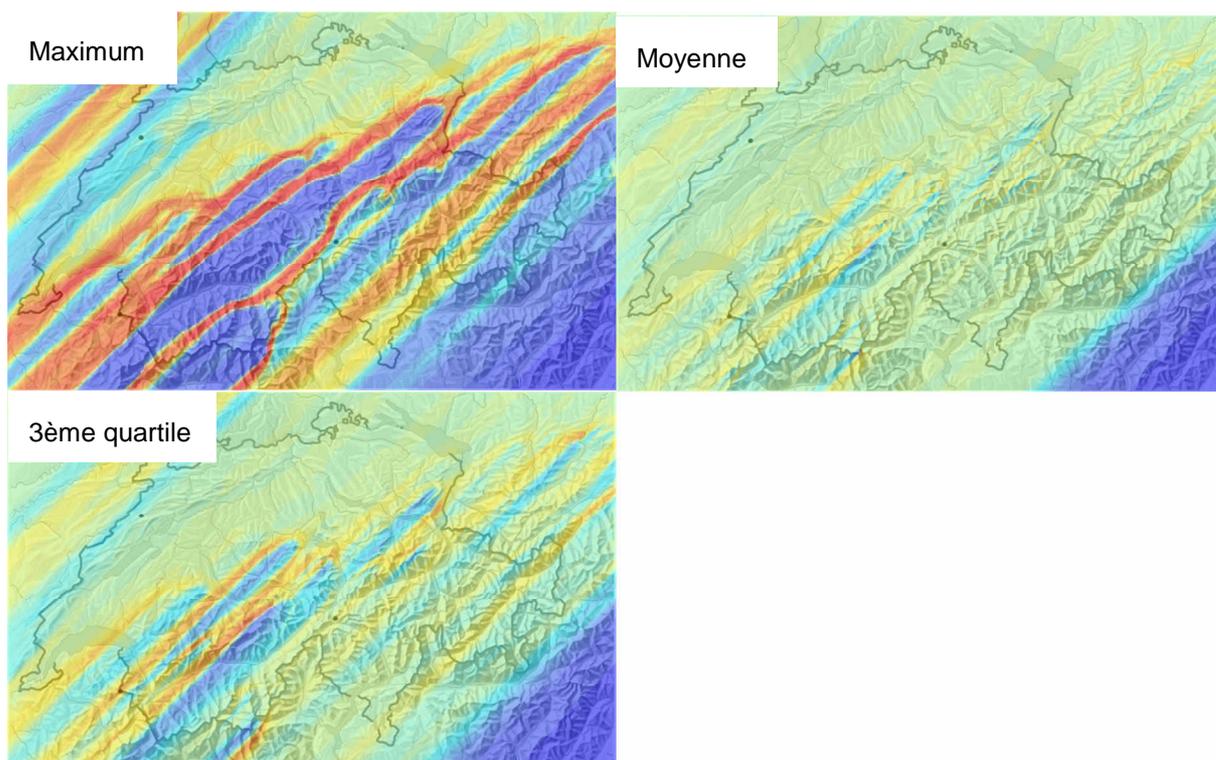


Fig. 7. Impact de la fonction par laquelle les valeurs altitudinales des carrés situés dans la trajectoire de vol sont intégrées dans le comportement ultérieur en tant que valeurs de référence. Cartes de densité par vent arrière faible et visibilité de 10 km (moving window = 21). La colorisation montre les déciles (valeurs partagés en dix parties égales), bleu foncé 1er décile – rouge 10ème décile).

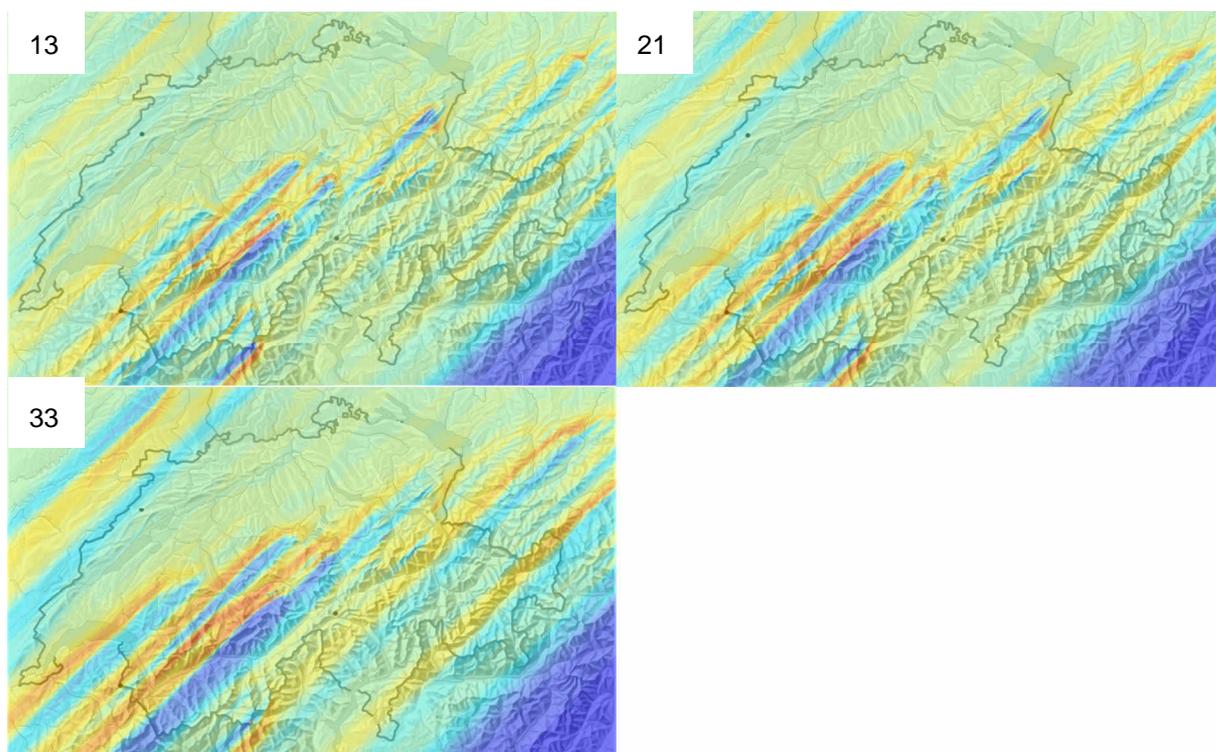


Fig. 8. Impact de la « moving window », interprétable comme distance de visibilité des oiseaux. Cartes de densité par vent arrière faible. La colorisation montre les déciles (valeurs partagés en dix parties égales), bleu foncé 1er décile – rouge 10ème décile).

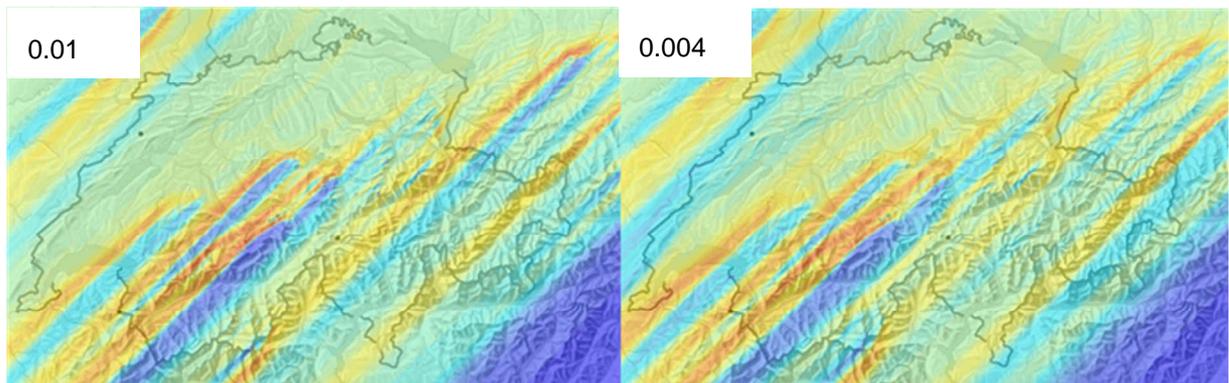


Fig. 9. Impact du paramètre a de la fonction sigmoïde (pente), qui détermine la montée en altitude ou l'évitement. Cartes de densité par vent arrière faible. La réaction à la différence d'altitude est plus variable à droite qu'à gauche. La colorisation montre les déciles (valeurs partagés en dix parties égales), bleu foncé 1er décile – rouge 10ème décile).

La fonction sigmoïde permet de déterminer comment les oiseaux mettent en œuvre l'information depuis l'altitude de leur trajectoire de vol. La courbe est définie par les deux paramètres a et b (2.4). Les différences nettes apparaissent quand le paramètre b est modifié. Celui-ci détermine bien davantage à partir de quelle différence d'altitude un carré voisin est évité. Si b égale 30, la topographie est clairement visible sur la carte de densité, alors que seules de faibles concentrations ne sont observées si b égale 700. Le paramètre a n'entraîne qu'un ajustement graduel, qui ne peut être apprécié que lors de l'analyse des distributions d'altitudes dans un carré. Le réglage des paramètres (déviation ou montée en altitude) s'est fondé sur des mesures radar de trajectoires de vol de divers oiseaux migrateurs dans les zones alpines (Liechti & Bruderer 1986).

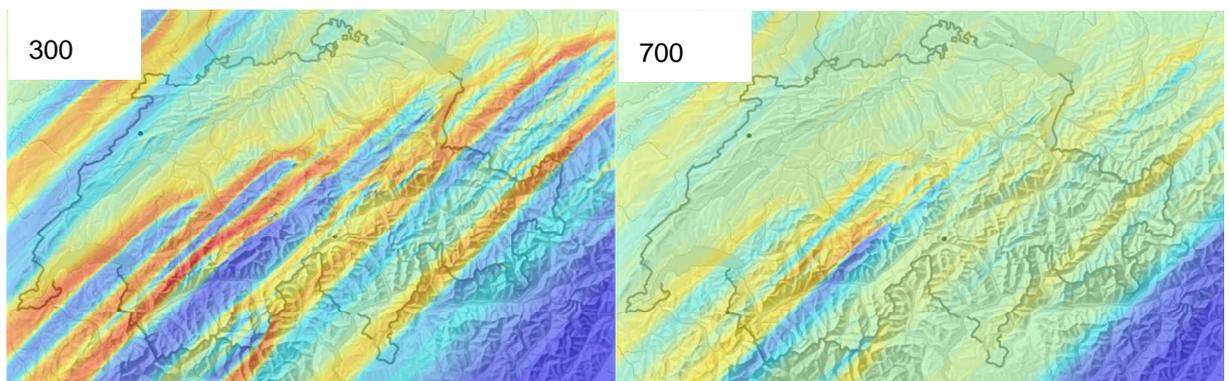


Fig. 10. Impact du paramètre b de la fonction sigmoïde (point d'inflexion), qui détermine la différence d'altitude à partir de laquelle 50% des oiseaux dévient leur trajectoire ou prennent de la hauteur. Cartes de densité par vent arrière faible. A gauche, 50% des oiseaux contourne l'obstacle en cas de différence d'altitude de 300 m ; à droite, dans le cas de 700 m. La colorisation montre les déciles (valeurs partagés en dix parties égales), bleu foncé 1er décile – rouge 10ème décile).

3.1.6 Incidence du vent sur le comportement en vol

La trajectoire de vol d'un oiseau migrateur dépend avant tout de la direction dans laquelle il entend voler (direction propre). Les observations faites depuis un site présentant une faible influence topographique et par des vents faibles ont révélé l'existence constante d'une certaine dispersion des trajectoires de vol autour d'une valeur moyenne, car il existe des différences individuelles entre les oi-

seaux migrateurs, tout comme des appartenances à des populations différentes se dirigeant vers des zones différentes.

Les valeurs moyennes de trajectoire de vol et de dispersion varient en fonction de la force et de la direction du vent (Bruderer & Liechti 1990). La déviation s'accroît avec l'augmentation de la force du vent (fig. 11 ; distributions de directions, cf. annexe fig. A1). En cas de vent inférieur à 5 m/s, l'influence est relativement faible, car les oiseaux peuvent compenser la dérive. Les vents supérieurs à 10 m/s exercent certes une forte influence sur la distribution de directions, mais l'expérience montre que peu d'oiseaux sont en route dans ces conditions. En cas de vent arrière (NE), les choses ne changent pas fondamentalement. Les lignes de concentration se resserrent toutefois. En cas de vent contraire moyennement fort (SO), les oiseaux semblent poussés à l'intérieur des Alpes, ce qui paraît tout à fait plausible. La distribution des densités en cas de fort vent contraire ne correspond guère à la réalité, car aucun oiseau migrateur ne se déplace dans ces conditions. En cas de vent latéral du NO, les oiseaux sont poussés vers des trajectoires plus méridionales, les concentrations migratoires correspondant aux observations. Les cartes de densité par vent latéral fort ou moyennement fort du SE sont sujettes à caution, car l'hypothèse de vents du SE sur l'ensemble de la Suisse n'est pas réaliste. Ce problème se pose d'une manière générale dans notre simulation. Selon la situation du vent, seule une partie de la carte de densité peut être jugée effectivement réaliste, car les vents peuvent différer sensiblement sur le Plateau et dans les vallées alpines. La différence est encore plus marquée quand on fait la distinction entre les régions situées au nord et au sud des Alpes.

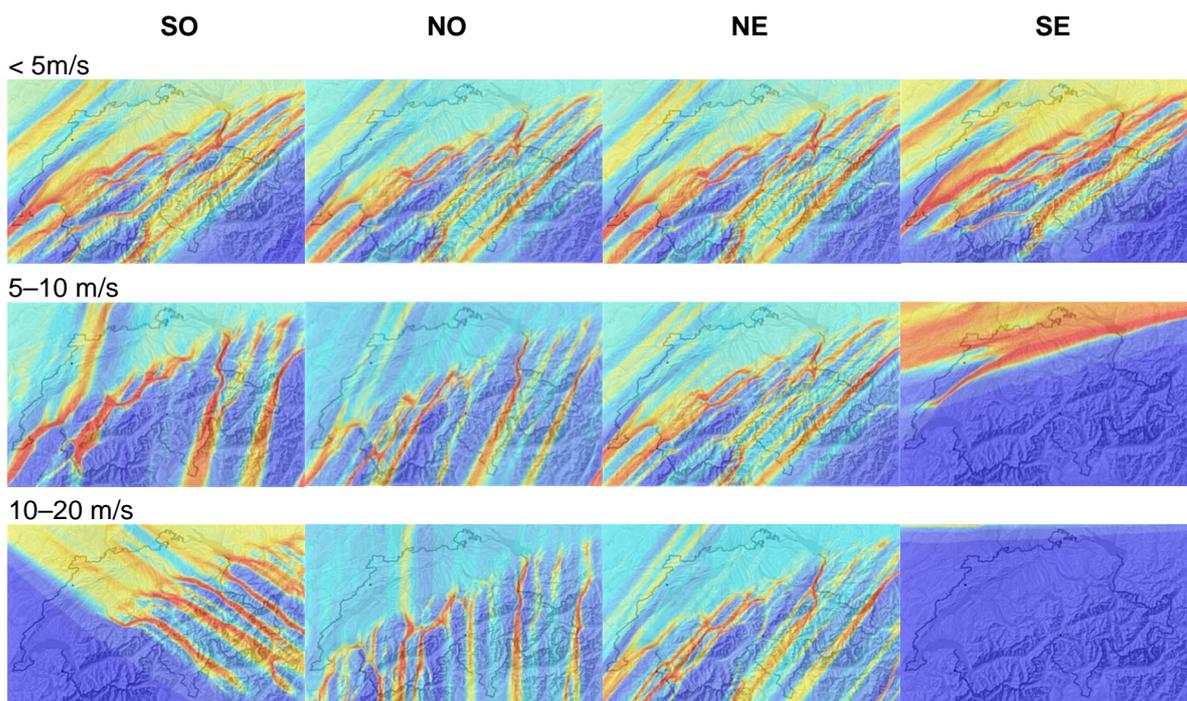


Fig. 11. Impact du vent. En dehors de la distribution des directions, tous les autres paramètres des cartes de densités sont identiques ($moving\ window = 33$, $aSigma = 0,008$, $bSigma = 400$, $flydown = 40$). La colorisation montre les déciles (valeurs partagés en dix parties égales), bleu foncé 1er décile – rouge 10ème décile).

3.2 Données comparatives

3.2.1 Lune

En automne 1994, dans le cadre d'une campagne d'observations lunaires, des données furent collectées sur le déroulement spatial de la migration nocturne des oiseaux (Liechti et al. 1996a, 1996b). A l'occasion d'une nuit claire de pleine lune, des observations furent effectuées dans l'ensemble de la Suisse (fig. 12). Cette nuit du 19 au 20 septembre 1994 fut une nuit de migration intense, durant laquelle sans doute 3 à 5 millions d'oiseaux ont traversé la Suisse. Comme le révèle la comparaison de deux simulations, certaines concordances ont certes été constatées, mais des divergences manifestes apparaissent également. Il ne faut pas perdre de vue qu'en cas d'observations lunaires, seuls les 1000 m inférieurs au-dessus du sol peuvent faire l'objet d'un recensement quantitatif. Autrement dit, la migration ne peut être recensée que partiellement, surtout dans les vallées situées derrière des cols ou des crêtes de montagne. Ce fait pourrait expliquer les divergences entre le modèle et les observations, notamment dans l'arc alpin.

Le modèle ne peut être adapté aux observations que dans une mesure limitée. Tous les paramètres ne peuvent être modifiés que par rapport au modèle global et non à des régions spécifiques. Ainsi, par exemple, la distance à laquelle un oiseau migrateur décide de contourner ou de survoler un obstacle est sans doute différente sur le Plateau et dans l'arc alpin. Il est aussi probable qu'un léger changement de trajectoire, une fois effectué, ne sera pas compensé dans l'immédiat, mais au contraire maintenu pendant une période prolongée. Cela devrait avoir pour effet que les concentrations se réduisent légèrement le long du versant nord des Alpes, mais que l'extension de ce front s'élargit quelque peu à mesure que la concentration augmente. La prise en considération de comportements spécifiques à une région et de ces décisions précédentes implique une extension notable du modèle, qui n'a pas été possible dans le cadre de la présente étude.

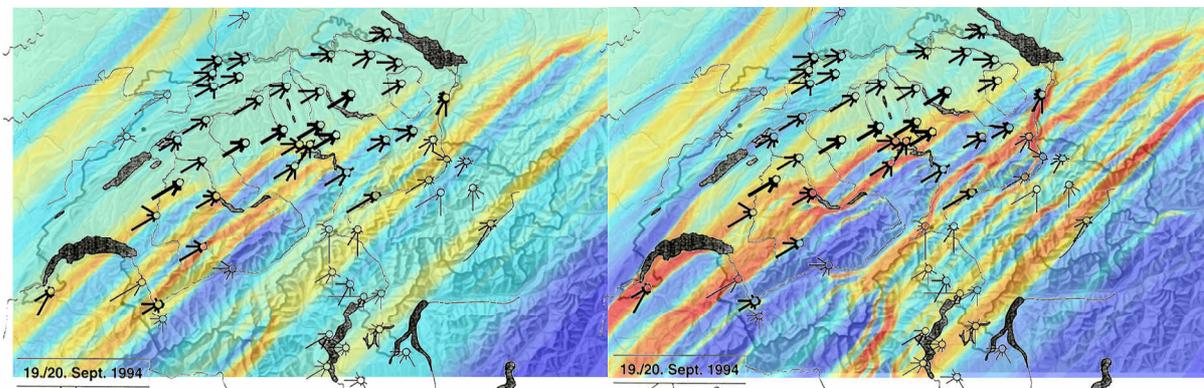


Fig. 12. Comparaison d'observations lunaires simultanées durant une nuit (19.-20.9.1994) à l'aide de deux simulations différentes. A : vent arrière – bonne visibilité – plutôt prendre de l'altitude et maintenir l'altitude de vol (moving window = 33, aSig_m = 0,008, bSig_m = 400, flydown = 0) B : vent arrière – bonne visibilité – plutôt prendre de l'altitude mais redescendre après l'obstacle (moving window = 33, aSig_m = 0,008, bSig_m = 400, flydown = 50). La colorisation montre les déciles (valeurs partagés en dix parties égales), bleu foncé 1er décile – rouge 10ème décile).

3.2.2 Appréciation des experts

En guise de validation complémentaire, nous avons comparé les résultats de la simulation avec le résultat d'une interprétation d'experts des années 1990 (Bruderer 1996). L'auteur de cette publication y a présenté les informations recueillies à l'époque sur la base d'observations sur le terrain et de mesures radar dans des cartes très claires. La comparaison purement visuelle des illustrations révèle à

l'évidence des parallèles (fig. 13 et 14), la situation en cas de vent contraire en particulier (fig. 14) présentant une bonne concordance entre le modèle des experts et le modèle numérique.

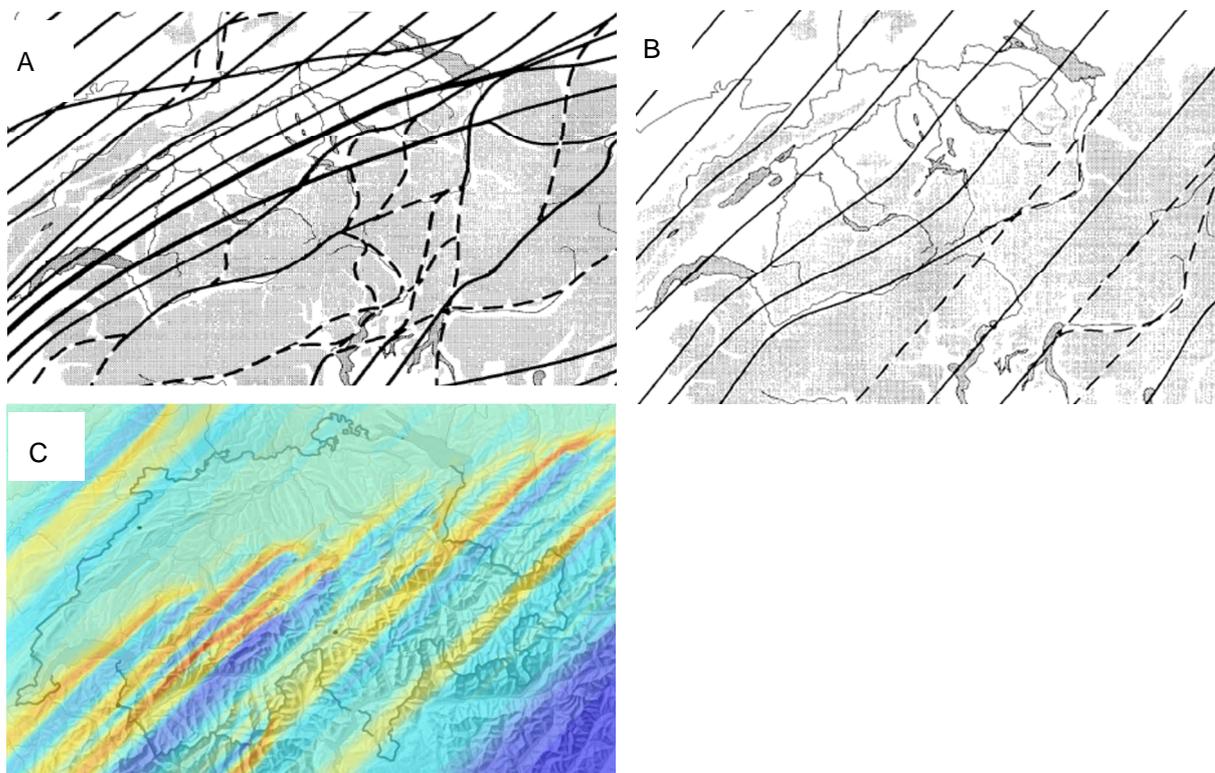


Fig. 13. Comparaison de la densité migratoire au-dessus de la Suisse par vent arrière faible entre le résultat de la simulation informatique (C) sans restriction d'altitude et la synthèse schématique et l'extrapolation d'informations disponibles sur les trajectoires de la migration, fondées sur des données radar (extraites de Bruderer 1996) concernant une migration basse (A) et haute (B). La colorisation montre les déciles (valeurs partagés en dix parties égales), bleu foncé 1er décile – rouge 10ème décile).

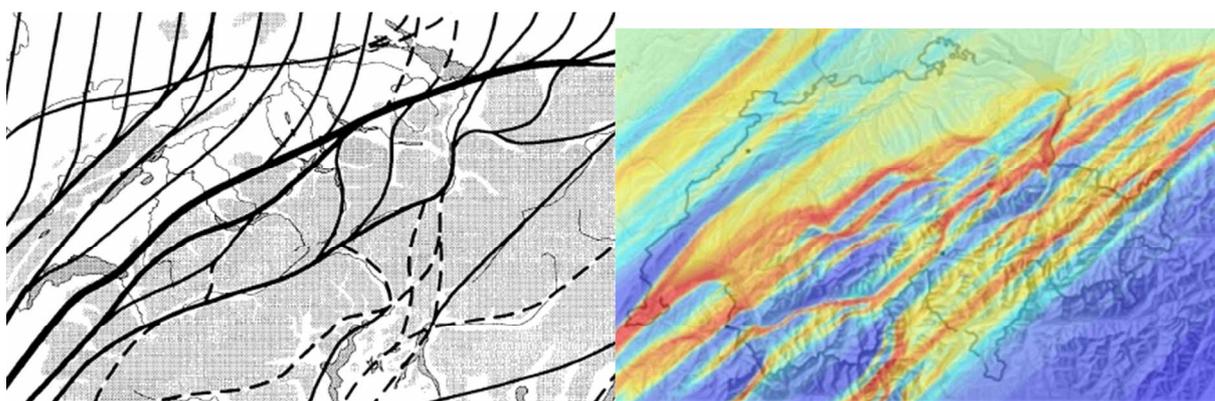


Fig. 14. Comparaison de la densité migratoire au-dessus de la Suisse par vent arrière faible entre le résultat de la simulation informatique (B) et la synthèse schématique et l'extrapolation d'informations disponibles sur les trajectoires de la migration, fondées sur des données radar (extraites de Bruderer 1996) (A). La colorisation montre les déciles (valeurs partagés en dix parties égales), bleu foncé 1er décile – rouge 10ème décile).

3.2.3 Mesures radar

Le radar permet de mesurer en permanence les intensités migratoires sur une période prolongée. Il est ainsi possible, d'une part, d'examiner les conditions de vent privilégiées par les oiseaux migrateurs et, d'autre part, de comparer les mesures effectuées sur différents sites.

Un site des Préalpes a fourni des mesures de l'intensité migratoire pendant toute une période de migration d'automne (du 21 août au 23 octobre 2009) ainsi que des données sur les vents dominants à l'échelon local. Cette période s'est caractérisée par un temps exceptionnellement clément, exempt de passages de front. Par conséquent, ces données fournissent certes des indications sur la mesure dans laquelle les oiseaux migrateurs exploitent différentes situations de vent, mais les situations de vent faible sont surreprésentées. Ces situations (force du vent ≤ 5 m/s) ont prédominé pendant 76% de la période d'observation, 77% des oiseaux étant en vol pendant que ces conditions prédominaient. Les vents arrière (vent du NE, force > 5 m/s) ont été observés pendant 9% de la période d'observation, 16% des oiseaux étant alors en vol. Les vents contraires et latéraux (vents de S à O, force > 5 m/s) ont représenté 14% de la période d'observation, 7% des oiseaux étant alors en vol. Nous avons simulé ces trois situations de vent en sélectionnant les paramètres du modèle en conséquence (fig. 15, annexe B). Nous les avons ensuite combinées moyennant une pondération de 7:2:1 pour établir une seule carte de densité selon nos données, et moyennant une pondération de 5:3:2 (fig. 18). Les pondérations plus modérées de 5:3:2 représentent, selon nos estimations, les conditions automnales moyennes mieux que celles issues des conditions particulières de l'automne 2009.

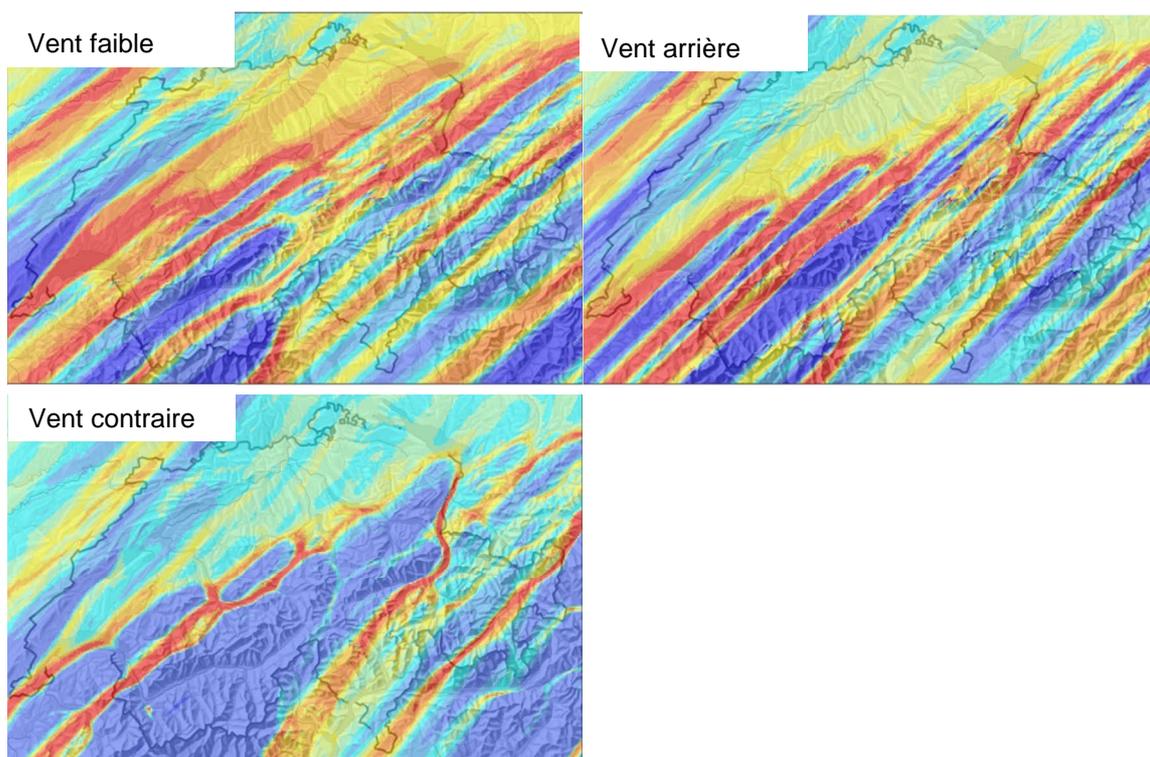


Fig. 15. Résultats de la simulation de densité pour les trois situations de vent durant la migration d'automne. La colorisation montre les déciles (valeurs partagés en dix parties égales), bleu foncé 1er décile – rouge 10ème décile).

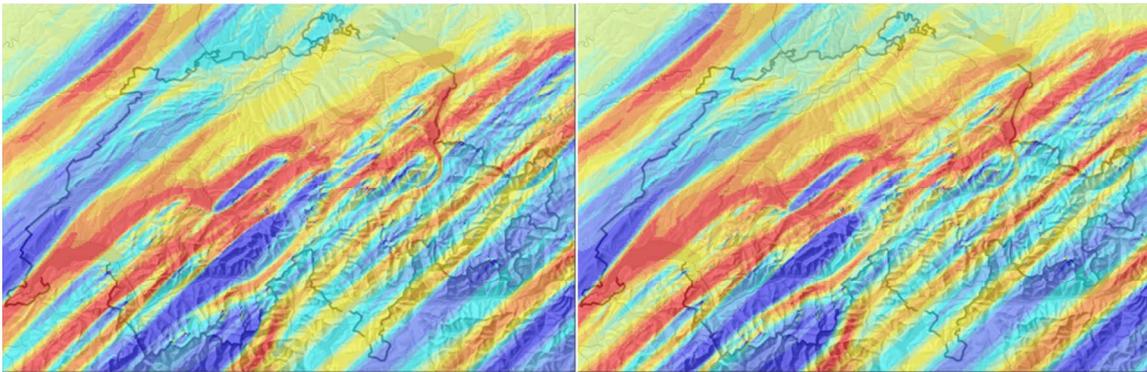


Fig. 16. Densité de migration d'automne résultant de la combinaison de vent faible, vent arrière et vent contraire (cf. fig. 15) dans un rapport de 5:3:2 (à gauche) et de 7:2:1 (à droite). La colorisation montre les déciles (valeurs partagés en dix parties égales), bleu foncé 1er décile – rouge 10ème décile).

3.3 Application des paramètres du modèle à la migration de printemps

L'ensemble des situations décrites jusqu'à présent se limitait aux phénomènes migratoires de l'automne. Nous avons choisi cette approche, car la recherche menée jusque-là fournit beaucoup plus de données sur la migration d'automne que sur celle de printemps. Nous pouvons toutefois supposer que les oiseaux migrateurs ont au printemps un comportement similaire à celui de l'automne par rapport au vent et à la topographie. Par conséquent, nous avons appliqué les mêmes paramètres de modèle pour la trajectoire inverse de prédilection (45°) et simulé la migration de printemps.

Concernant l'automne, nous pouvions supposer que les oiseaux migrateurs s'approchent de la Suisse, depuis le nord, selon une répartition homogène. La ligne de départ a été choisie de façon à aller assez loin à l'est pour que nous puissions simuler les densités migratoires sur l'ensemble du territoire suisse en cas de prédilection pour une trajectoire vers le sud-ouest. Pour le printemps, nous devons opter pour une hypothèse plus nuancée, car les Alpes représentent une barrière non négligeable pour les oiseaux venant du sud. Il en résulte des densités différentes d'oiseaux migrateurs lors de leur entrée en Suisse par l'ouest ou par le sud. Pour obtenir des densités migratoires sur l'ensemble de la surface du pays, nous avons complété la ligne de départ ouest-est au sud par une ligne nord-sud à l'ouest. Sur la ligne de départ ouest-est, nous avons supposé que la densité serait deux fois moins grande au-dessus de l'arc alpin que sur le prolongement oriental de la ligne de départ (Italie septentrionale – plaine du Po).

A l'instar du processus choisi pour l'automne, nous nous sommes fondés sur trois trajectoires préférentielles, résultant des conditions de vent dominantes (annexe A, fig. A2). Les oiseaux migrateurs se déplacent le plus souvent par vent faible. La carte de densité établie dans cette situation révèle une nette canalisation le long de la chaîne du Jura (fig. 17). Concernant la deuxième situation la plus fréquente (vent arrière de 5–10 m/s), nous obtenons une entrée supplémentaire dans les vallées alpines. En cas de vent contraire modéré (5–10 m/s), troisième situation la plus fréquente, nous obtenons un résultat analogue à celui constaté par vent faible, mais avec une dispersion plus large de la migration depuis la chaîne du Jura jusque sur le Plateau.

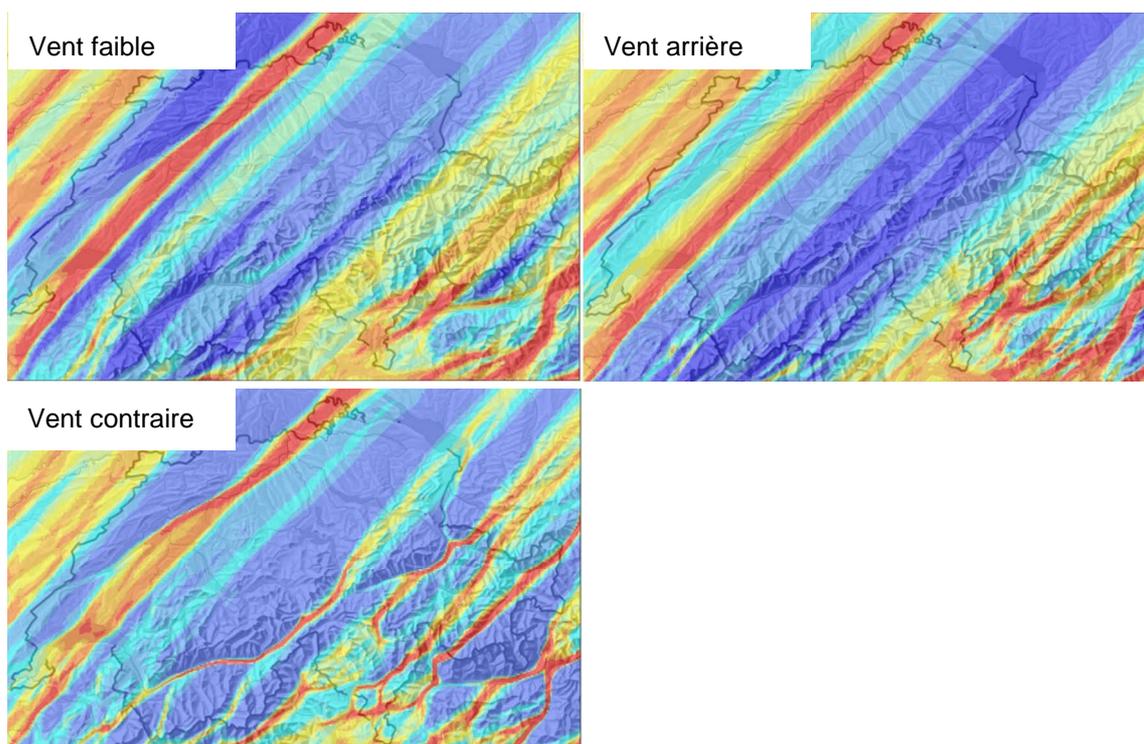


Fig. 17. Résultats de la simulation de densité pour les trois situations de vent durant la migration de printemps. La colorisation montre les déciles (valeurs partagés en dix parties égales), bleu foncé 1er décile – rouge 10ème décile).

Au printemps aussi, nous avons présupposé que 50% des oiseaux migrent par vent faible, 30% par vent arrière et 20% par vent contraire. Nous avons combiné les cartes de densité selon une pondération de 5:3:2 pour obtenir une carte de densité migratoire de printemps (fig. 18).

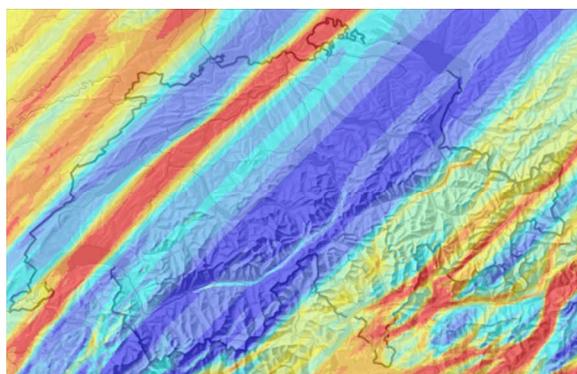


Fig. 18. Densité de migration d'automne résultant de la combinaison de vent faible, vent arrière et vent contraire dans un rapport de 5:3:2. La colorisation montre les déciles (valeurs partagés en dix parties égales), bleu foncé 1er décile – rouge 10ème décile).

4. Résultats

4.1 Analyse de sensibilité

Le modèle choisi est suffisamment souple pour simuler les déroulements de migration connus et imaginables à travers la Suisse. Ainsi, la faible dépendance topographique relative par vent d'est peut

faire l'objet d'une visualisation plausible aussi bien que la forte dépendance topographique liée au vent d'ouest et aux nuages bas (fig. 19).

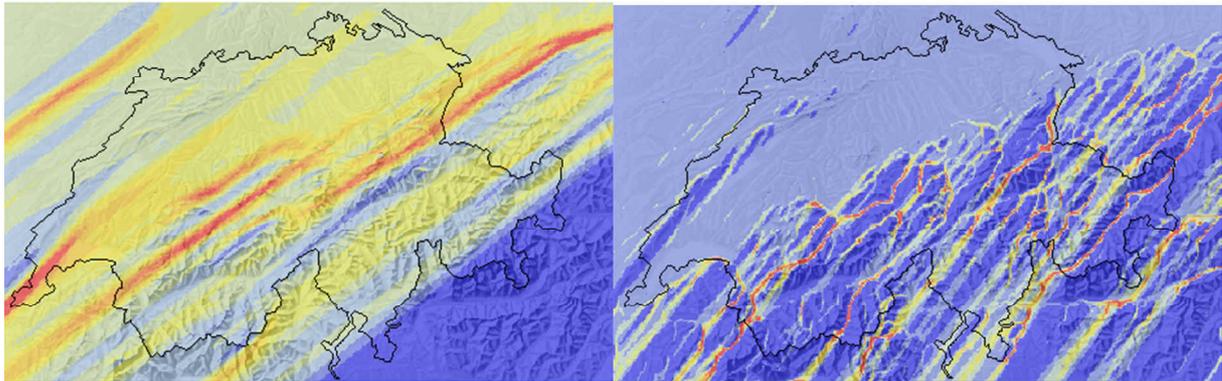


Fig. 19. Le graphique de gauche présente une situation caractérisée par un vent arrière favorable et une bonne visibilité. Le graphique de droite présente une situation caractérisée par un léger vent contraire (vent d'ouest) et une mauvaise visibilité et des nuages à basse altitude. La colorisation montre les déciles (valeurs partagés en dix parties égales), bleu foncé 1er décile – rouge 10ème décile).

Les résultats de la modélisation peuvent être surtout modifiés par les paramètres de la visibilité et du comportement en vol (évitement ou montée ; paramètres aSigm, bSigm). La vérification a montré que ce modèle permettait de reproduire aussi bien l'expérience des experts (chap. 3.2.2) que les résultats de mesures ponctuelles (chap. 4.2). Cependant, aucune comparaison précise avec, par exemple, des déroulements temporels intégrant les conditions météorologiques effectives n'a pu être effectuée dans le cadre du présent travail. Une dynamisation du modèle, telle qu'elle n'est prévue que dans un second temps, serait nécessaire à cet effet. La vérification repose donc sur une comparaison semi-quantitative entre les différentes données d'observation et de mesure et une appréciation d'experts.

4.2 Validation de la modélisation d'automne

Concernant la validation du modèle, nous avons comparé les résultats des simulations informatiques avec ceux des mesures radar de cinq sites : Plateau, Jura, Préalpes, sud-ouest des Alpes et Alpes centrales (cf. fig. 20). Sur ces cinq sites, la migration d'automne a été enregistrée durant deux à trois mois. Ces données de base proviennent de plusieurs années. Le volume migratoire journalier mesuré sur un certain site varie très fortement, car il dépend des conditions météorologiques et du volume migratoire potentiel. Les conditions météorologiques varient aussi d'une année à l'autre. Par conséquent, il convient d'interpréter sous réserve la comparaison directe entre les densités migratoires. La valeur moyenne des observations disponibles, effectuées durant toute la période migratoire principale, peuvent toutefois être intégrées dans la comparaison entre les sites, car les différences journalières se compensent au cours d'une saison.

Pour la vérification de la simulation, nous avons calculé la densité migratoire moyenne par jour de la période d'observation pour lequel nous disposons de mesures provenant des cinq sites (tab. 2). L'unité de calcul était la journée calendaire (de minuit à minuit).

Tab. 2. Intensités migratoires moyennes mesurées au radar du 25 août au 18 octobre, et rapports relatifs entre les sites. MTR = Migration Traffic Rate [oiseaux $h^{-1} km^{-1}$], SD = écart standard.

	Migration globale		Migration à moins de 200 m au-dessus du sol	
	MTR (SD)	Rapport	MTR (SD)	Rapport
Alpes centrales 2010	97 (97)	1	10 (9)	1
Jura 2010	381 (281)	4	156 (95)	16
Sud-ouest des Alpes 2007	451 (375)	5	136 (93)	14
Plateau 2008	605 (860)	6	124 (172)	13
Préalpes 2009	1168 (603)	12	100 (50)	10

Les rapports relatifs figuraient sur les cartes de densité présentées jusqu'à présent (quartiles de 10% ; bleu pour les minima, rouge pour les maxima). Pour la comparaison des densités migratoires absolues, les valeurs calculées ont été réparties en intervalles de même taille. Des valeurs absolues ont été attribuées à ces catégories de densité (fig. 20). A cet effet, les densités migratoires calculées au radar ont été intégrées (tab. 1).

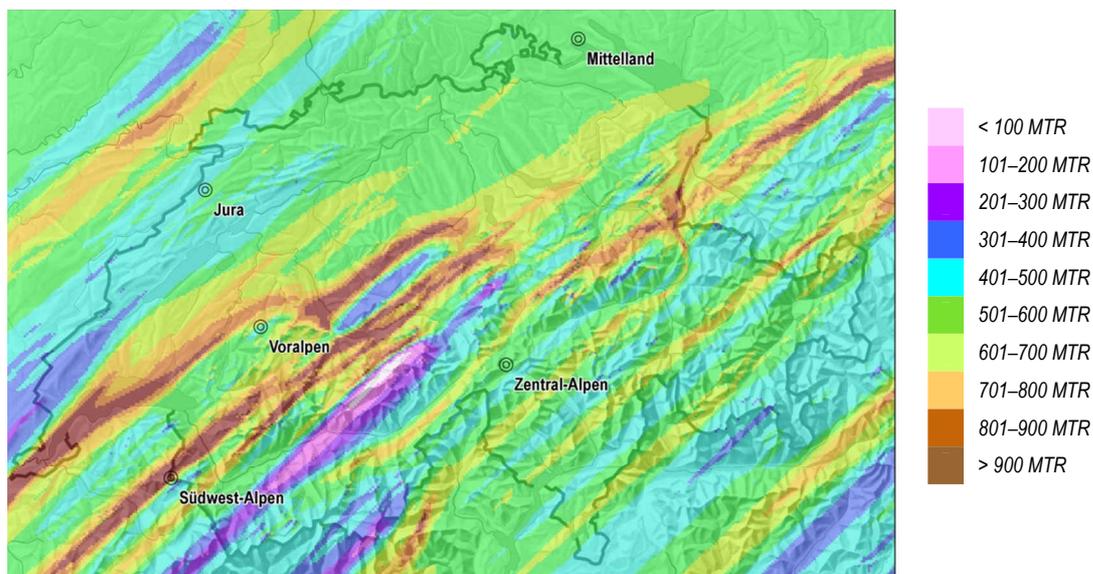


Fig. 20. Densités migratoires d'automne présentées en valeurs absolues. Cette présentation permet une comparaison directe avec les résultats des observations radar (tab. 2).

L'altitude de vol moyenne est calculée en même temps que la densité migratoire pour chaque cellule (fig. 21). Les oiseaux ont une altitude de vol bas au-dessus des collines et des montagnes et une altitude plus élevée au-dessus des vallées. Par conséquent, la carte des altitudes de vol moyennes reproduit nettement la topographie.

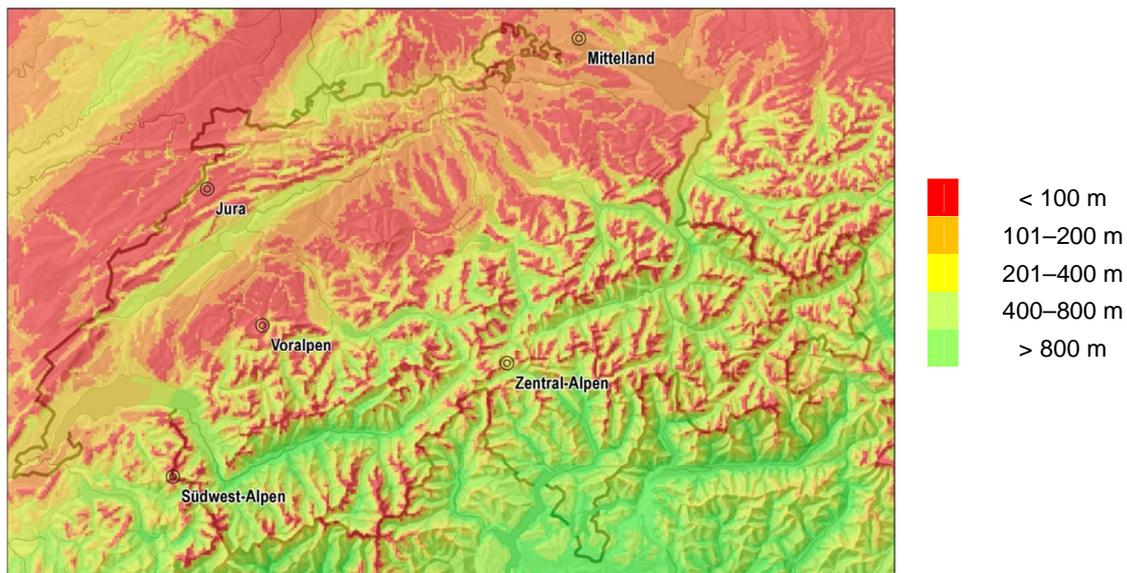


Fig. 21. Altitude de vol moyenne en automne, présentée en valeurs absolues au-dessus du sol. Les oiseaux survolent à plus basse altitude les reliefs topographiques que les vallées, de sorte que la carte d'altitude reflète parfaitement la topographie de la Suisse.

L'altitude de vol moyenne peut être interprétée comme un paramètre de la distribution altitudinale des oiseaux en un lieu déterminé. A cet effet, en guise de simplification, nous supposons une distribution altitudinale homogène de la densité migratoire entre 0 m et le double de l'altitude de vol moyenne. Il en résulte une évaluation très conservatrice de la densité migratoire à basse altitude, car les distributions altitudinales observées présentent une densité décroissante à mesure que l'altitude augmente (Bruderer & Liechti 2004). La simulation a pour objectif d'évaluer le nombre d'oiseaux volant à une distance dangereuse des éoliennes, c'est-à-dire sous les 200 m au-dessus du sol. L'altitude de vol moyenne permet de calculer comme suit la part des oiseaux volant entre 0 et 200 m :

$$\text{Densité migratoire}_{\leq 200m} = \text{Densité migratoire} * \frac{1}{\text{Altitude de vol moyenne}} * 100$$

Cela signifie, par exemple, qu'en cas d'altitude de vol moyenne de 200 m, 50% des oiseaux volent à moins de 200 m du sol, et qu'en cas d'altitude de vol moyenne de 1000 m, 10% des oiseaux le font. Les altitudes de vol moyennes inférieures à 100 m sont fixées à 100 m ; sinon, la densité migratoire de la cellule correspondante serait supérieure à 100%. Les densités migratoires ainsi calculées dans les 200 m au-dessus du sol sont présentées sous forme d'une carte. A cet effet, les valeurs de densité sont réparties à intervalles réguliers et affectées à des valeurs absolues à l'aide des données radar (tab. 2) (fig. 22).

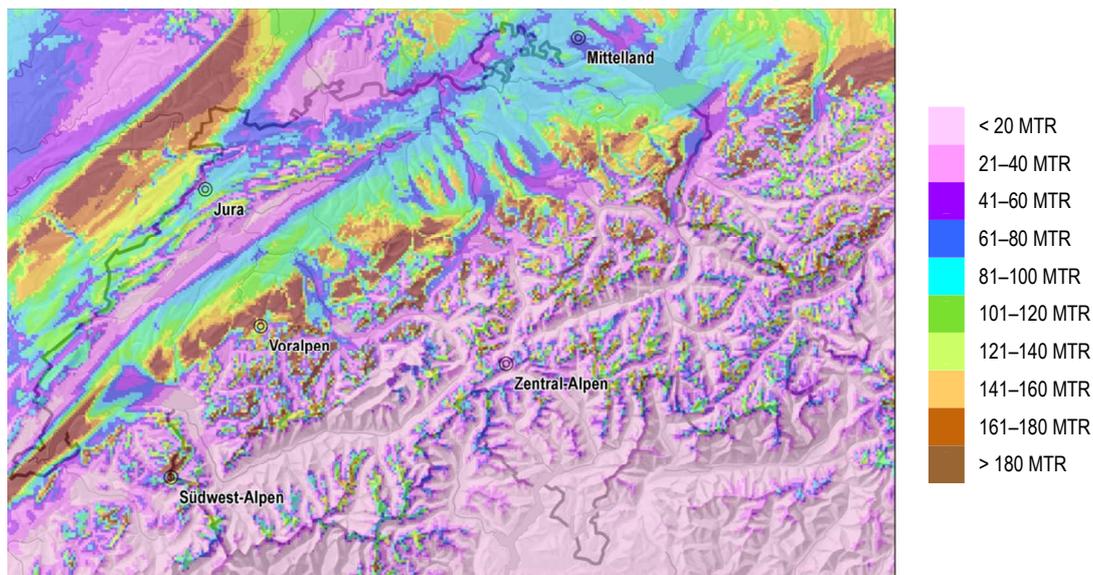


Fig. 22. Densités migratoires en automne à une altitude de vol inférieure à 200 m. Cette carte permet une comparaison directe avec les résultats des observations radar (tab. 2)

Il est désormais possible de vérifier si la situation suggérée par la simulation informatique correspond bien aux rapports effectivement calculés. Une importance particulière revient aux densités évaluées à moins de 200 m au-dessus du sol, car ces données constituent la base directe de la carte des conflits (fig. 22). Sur le site des Alpes centrales, le résultat de la simulation informatique présente une valeur très basse correspondant aux densités observées. Les maxima concernent les sites des Préalpes et du sud-ouest des Alpes, qui devraient même être au moins 10 fois supérieurs d'après les observations sur le terrain. Sur les sites du Jura et du Plateau, les densités simulées semblent légèrement sous-estimées. Cette vérification n'est possible que pour l'automne, car aucune donnée correspondante sur le terrain n'est disponible pour le printemps.

4.3 Modélisation de printemps

Le processus décrit au chapitre 4.2 (Validation) a été appliqué au printemps, même si aucune comparaison avec des observations sur le terrain n'était possible (fig. 23). Par conséquent, il nous est difficile d'évaluer si les rapports de densité correspondent à la réalité. Nous escomptons cependant que les densités migratoires au sud des Alpes sont plus élevées au printemps qu'en automne. La canalisation de la migration le long de la chaîne du Jura est plausible selon les experts. Pour aboutir au résultat définitif de la présente étude, il est essentiel que la simulation du printemps puisse être intégrée, afin que le potentiel de conflit au Tessin ne soit pas sous-estimé. A l'instar du processus appliqué à la migration d'automne, nous avons aussi calculé les altitudes de vol moyennes relatives à la migration de printemps (fig. 24) et déduit les intensités migratoires à moins de 200 m au-dessus du sol (fig. 25).

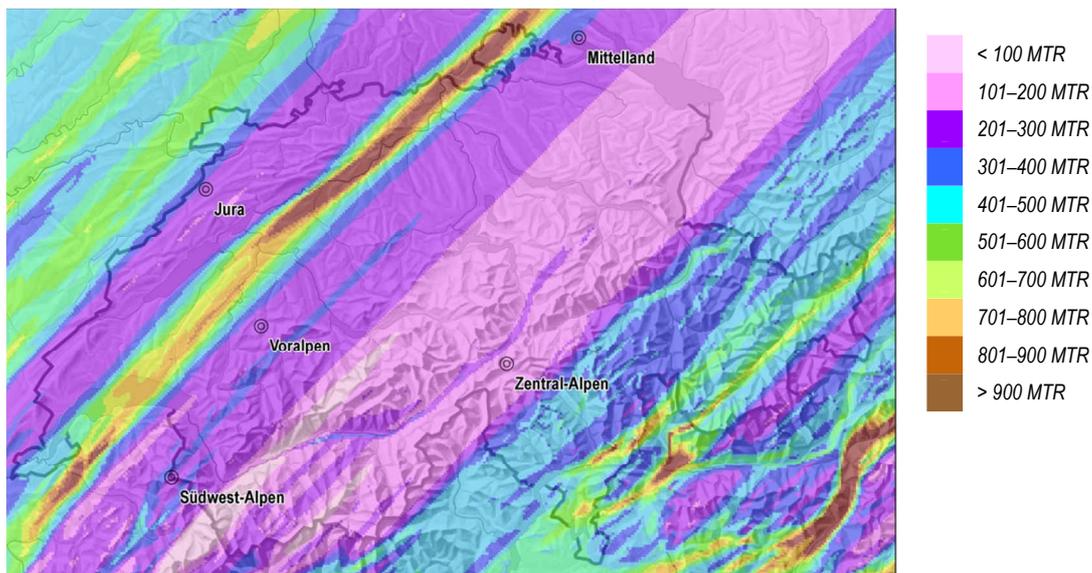


Fig. 23. Densités migratoires de printemps présentées en valeurs absolues, comme pour la migration d'automne.

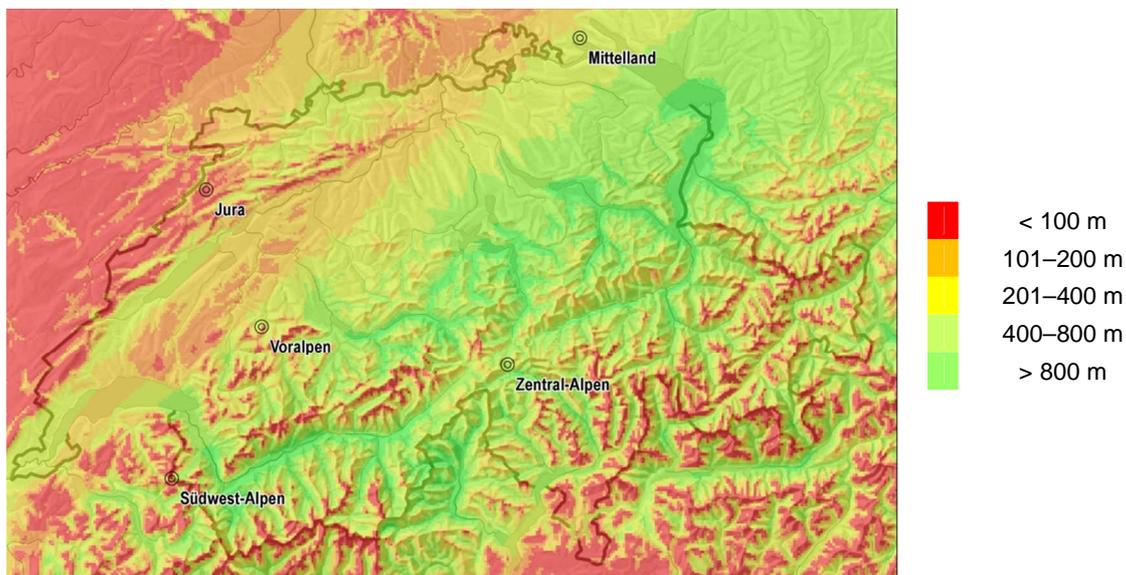


Fig. 24. Altitude de vol moyenne par cellule au printemps, présentée en valeurs absolues au-dessus du sol. Les oiseaux survolent à plus basse altitude les reliefs topographiques que les vallées, de sorte que la carte d'altitude reflète parfaitement la topographie de la Suisse.

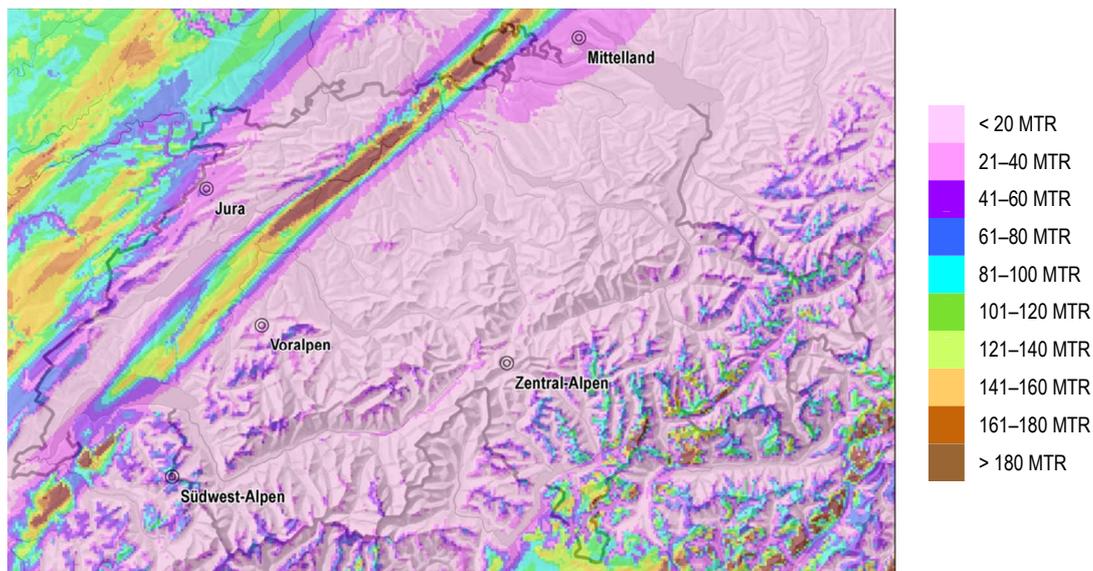


Fig. 25. Densités migratoires de printemps entre 0 et 200 m au-dessus du sol. La vérification de cette simulation informatique par rapport à la migration réelle n'est pas possible faute de relevés correspondants.

4.4 Carte suisse des conflits potentiels entre l'énergie éolienne et les oiseaux : partie oiseaux migrants

La *Carte suisse des conflits potentiels entre l'énergie éolienne et les oiseaux : partie oiseaux migrants* repose sur le modèle informatique décrit plus haut. Il se fonde sur les trois facteurs : comportement en vol, topographie et vent. Il met en évidence la densité migratoire relative modélisée qu'il est permis d'envisager sur un site donné. L'élaboration d'une carte de densité migratoire moyenne a pris en compte les diverses situations météorologiques et leur fréquence. En outre, le calcul a été pondéré des densités migratoires moyennes estimées dans les différentes situations météorologiques. Il a été effectué séparément pour l'automne et le printemps, et les résultats ont ensuite été combinés (fig. 26). Les données relatives à la migration d'automne ont été dotées d'une pondération double par rapport à celles de printemps. Au printemps, en raison de la mortalité naturelle survenant durant la migration et dans les quartiers d'hiver, la population migratoire est nettement plus réduite qu'en automne, quand elle est augmentée par la présence des jeunes oiseaux. La figure 27 présente l'intensité migratoire moyenne dans la fourchette d'altitude 0-200 m au-dessus du sol, déterminante par rapport à la production d'énergie éolienne.

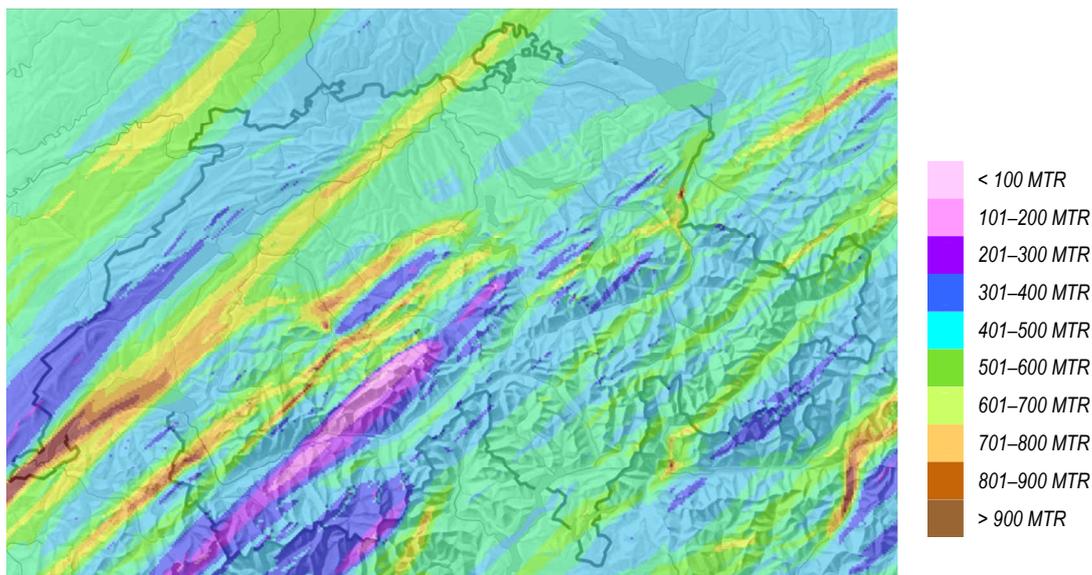


Fig. 26. Densités migratoires modélisées concernant la Suisse.

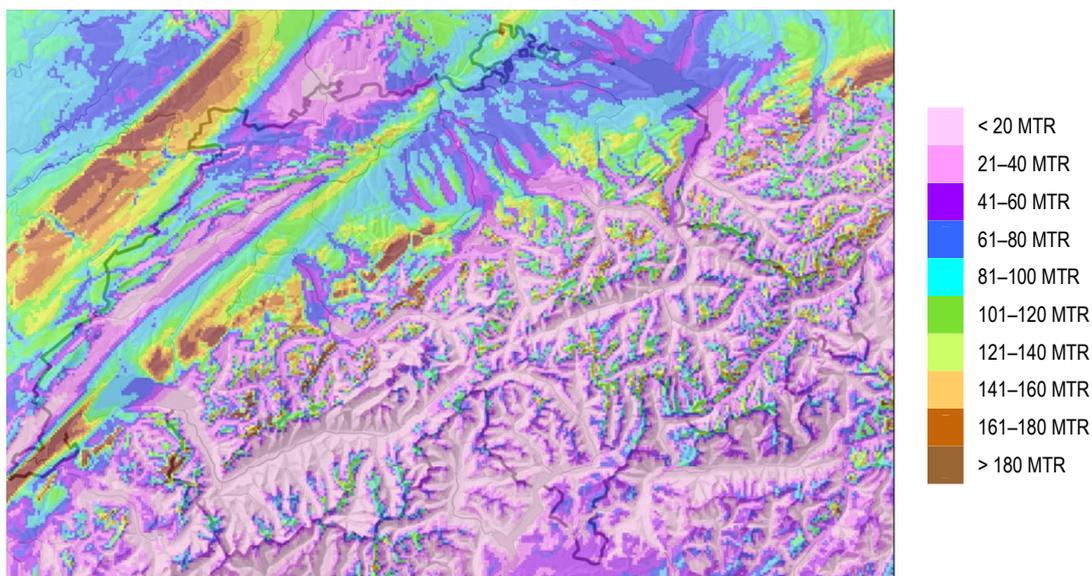
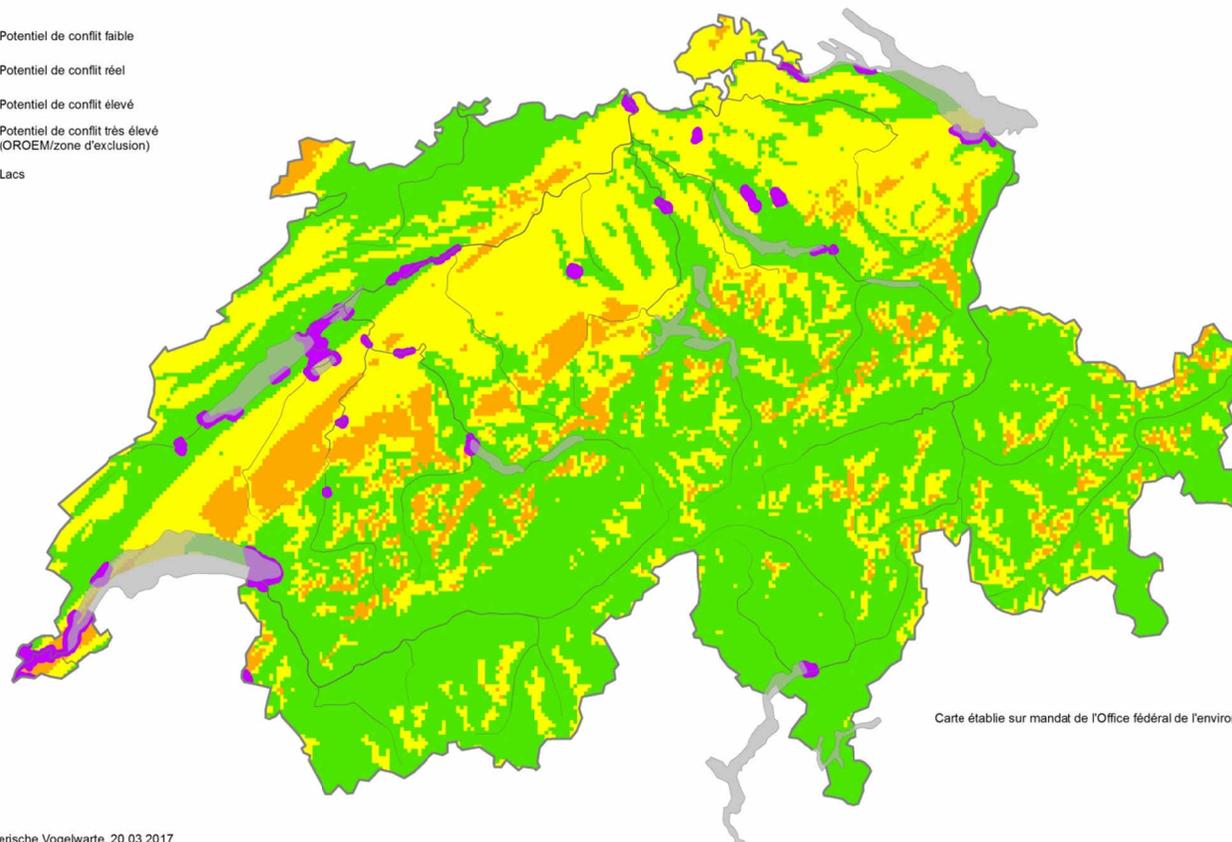


Fig. 27. Densités migratoires modélisées concernant la fourchette altitudinale 0-200 m au-dessus du sol, fondées sur la fig. 26.

Sur la base des résultats de la validation, des valeurs absolues ont été attribuées aux densités migratoires relatives, d'après les intensités migratoires moyennes mesurées (nombre d'oiseaux par kilomètre et par heure). La carte qui en résulte regroupe les intensités migratoires dans trois catégories de risque (fig. 28). Pour le classement des catégories du risque potentiel, nous avons choisi 50 MRT comme valeur de seuil, ce qui se justifie par l'évaluation du risque de collision potentiel (chapitre 6.2). Les trois catégories de risque potentiel sont : 1 = zones à intensité migratoire inférieure dans la majorité des cas < 50 MRT (vert), 2 = zones à intensité migratoire moyenne 50-100 MRT (jaune), 3 = zones à intensité migratoire supérieure > 100 MRT (orange). Il importe de ne pas oublier qu'en principe, de fortes concentrations migratoires peuvent survenir dans toutes les zones en fonctions des conditions ambiantes. La carte des risques pondère en premier lieu la fréquence de ces événements.

Carte suisse des conflits potentiels entre l'énergie éolienne et les oiseaux: partie oiseaux migrateurs
Mise à jour 2013



Carte établie sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)

© Schweizerische Vogelwarte, 20.03.2017

Fig. 28. La carte présente le potentiel de conflit moyen entre la migration aviaire et l'énergie éolienne en Suisse. Les trois catégories de risque potentiel correspondent à : vert = potentiel de conflit faible, jaune = potentiel de conflit réel, orange = potentiel de conflit élevé. Les réserves naturelles protégées par l'ordonnance sur les réserves d'oiseaux d'eau et de migrateurs d'importance internationale et nationale (OROEM), qui sont déjà considérées sur la Carte suisse des conflits potentiels entre l'énergie éolienne et les oiseaux: partie oiseaux nicheurs, hôtes de passage et réserves naturelles OROEM, mise à jour 2013 (Horch et al. 2013), sont représentées en violet.

5. Pertinence de la carte

La présente *Carte suisse des conflits potentiels entre l'énergie éolienne et les oiseaux : partie oiseaux migrants* constitue une information préliminaire ; autrement dit, il faut la considérer comme une source d'information sommaire dans le cadre de la planification de parcs éoliens. Elle montre l'ampleur des risques à prévoir pour les oiseaux migrants sur un site déterminé à l'échelle nationale. La carte a dû être mise à jour en 2013 suite à une inexactitude lors du calcul de la combinaison de la migration printanière et automnale.

La carte se fonde sur les acquis scientifiques actuels. De nombreuses mesures et observations sont disponibles en ce qui concerne le déroulement de la migration des oiseaux. Les données provenant de sites traditionnels d'observation sont souvent très limitées dans le temps (observations le week-end, p. ex.) et ne couvrent, du moins sur le plan quantitatif, qu'une section relativement réduite de la migration (< 100 m au-dessus du sol). Les rares mesures quantitatives effectuées par radar permettent certes d'évaluer la corrélation entre les situations météorologiques et l'intensité migratoire, mais n'autorise aucune affirmation définitive concernant la répartition géographique de la migration à l'échelle nationale. Pour cette raison, la carte des conflits a été établie sur la base d'un modèle et les données disponibles ont été utilisées pour la validation des résultats de la modélisation.

La carte représente le déroulement général de la migration à travers la Suisse. Elle indique où des intensités migratoires élevées sont à prévoir dans la fourchette altitudinale des éoliennes (< 200 m au-dessus du sol) et où la migration devrait être plutôt faible. La carte ne remplace pas une appréciation locale du conflit entre les oiseaux migrants et les éoliennes.

5.1 Catégories de risque

Basée sur la modélisation informatique, la *Carte suisse des conflits potentiels entre l'énergie éolienne et les oiseaux : partie oiseaux migrants* distingue trois catégories de risque (potentiel de conflit *faible*, *réel* et *élevé*). La répartition se fonde sur les intensités migratoires estimées dans la fourchette altitudinale 0–200 m au-dessus du sol pour une grille de 1 km². Les intensités migratoires à cette altitude sont directement proportionnelles au risque de collision potentiel (potentiel de risque) entre oiseaux migrants et éoliennes.

Dans les zones vertes, une intensité migratoire moyenne de moins de 50 oiseaux par km et par heure est à prévoir (MTR < 50). Il est probable que, dans le cas d'intensités migratoires de cet ordre, moins de 10 collisions surviennent par an et par éolienne. Dans les zones jaunes (MTR de 50 à 100), 10 à 20 collisions sont à prévoir par an et par éolienne. Dans les zones orange, les intensités migratoires supérieures à la moyenne (MTR > 100) laissent augurer plus de 20 collisions par an et par éolienne. La conversion des intensités migratoires en taux de collision s'est fondée sur plusieurs hypothèses présentées en détail au chapitre 6.2. Taux de collision et calcul de la valeur seuil.

Les réserves naturelles protégées par l'*ordonnance sur les réserves d'oiseaux d'eau et de migrateurs d'importance internationale et nationale (OROEM)*, qui sont déjà considérées sur la *Carte suisse des conflits potentiels entre l'énergie éolienne et les oiseaux: partie oiseaux nicheurs, hôtes de passage et réserves naturelles OROEM, mise à jour 2013* (Horch et al. 2013), sont représentées en violet. Sur ces surfaces, la station ornithologique suisse recommande de renoncer à tout projet d'exploitation d'énergie éolienne.

5.2 Interprétation des résultats

L'approche du modèle et la possibilité de validation limitée ont pour conséquence que les résultats présentent une relative incertitude dans la représentation géographique. D'une part, il y a la complexité de la topographie suisse, qui, combinée avec les vents dominants, peut avoir des incidences très différentes à l'échelle locale et régionale sur la migration aviaire. Pour assurer la simplicité du modèle, nous n'avons utilisé aucun paramètre géographique explicite en dehors de l'orographie, ce qui a pour conséquence que les comportements et les conditions météorologiques ont été intégrés dans le modèle en tant que facteur général, dans la mesure où aucune différenciation régionale ou locale n'était possible. D'autre part, le comportement des oiseaux migrateurs est influencé par la condition physique et l'évolution météorologique, et, qui plus est, ces facteurs peuvent varier d'une espèce à l'autre. Ces facteurs ont été fortement simplifiés et généralisés dans le modèle.

Dans le cadre de la validation (chap. 4.2), il a été possible de montrer que les paramètres choisis suffisaient pour reproduire la variabilité jusqu'ici connue de la migration des oiseaux. Cependant, il est clair qu'aucune définition des paramètres ne peut suffisamment reproduire le phénomène migratoire pour l'ensemble de la Suisse. Il en résulte le problème que la qualité de la modélisation varie fortement d'une région à l'autre. Soit les simulations reproduisent bien la situation du Plateau et du Jura et plutôt mal celle des Alpes, soit c'est le contraire. D'une manière générale, la modélisation est plus difficile dans les zones alpines, car la plus grande complexité orographique laisse supposer une plus grande complexité du comportement en vol. Des écarts importants sont possibles à l'échelle locale et régionale. En ce qui concerne notamment les paramètres caractérisant la visibilité et la dérive due au vent, il est à prévoir qu'une régionalisation (c'est-à-dire des valeurs paramétriques variables sur le plan géographique) permettrait d'obtenir une amélioration notable. D'une part, les vents locaux peuvent s'écarter sensiblement de la situation générale des vents ; d'autre part, une résolution géographique de 1 km² ne permet qu'une reproduction limitée de la situation réelle dans les vallées et les cols étroits.

Pour la pondération des résultats regroupés dans la carte des conflits finale, nous avons accordé une plus grande importance à la situation du plateau, du Jura et du versant nord des Alpes, dans la mesure où ces régions permettaient une modélisation plus fiable que les zones alpines. Les résultats de notre modélisation concordent avec les relevés sur le terrain, qui ont montré qu'un potentiel de collision considérable était à prévoir sur divers sites connus pour l'intensité de la migration aviaire (notamment le long du versant nord des Alpes, p. ex. Gurnigel, col de Hahnenmoos, col de Jaman, col de Bretolet). La pertinence de la carte dans le cadre d'études préliminaires menées dans l'arc alpin est donc limitée et doit être compensée par des études locales plus précises.

La carte se fonde sur le comportement en vol des adeptes du vol battu, c'est-à-dire des oiseaux migrateurs qui pratiquent un vol actif et ne sont pas tributaires de courants ascendants comme les planeurs. Les expériences acquises lors d'observations sur le terrain révèlent toutefois qu'une forte concentration d'adeptes du col battu (le plus souvent, de petits oiseaux) peut aussi être observée en général là où des planeurs se concentrent. Il est donc à prévoir que la carte représente aussi la migration des oiseaux planeurs jusqu'à un certain degré. La restriction nécessaire formulée plus haut en ce qui concerne une appréciation locale s'applique tout particulièrement à ce groupe de migrateurs.

Recommandation concernant les catégories de risque basée sur la modélisation informatique (vert, jaune, orange)

Nous considérons, par rapport à la migration aviaire et aux espèces et populations concernées, qu'un nombre de 10 collisions par an et par éolienne est provisoirement défendable. Ce faisant, nous estimons que le nombre de 1000 éoliennes ne sera pas dépassé en Suisse et que les espèces menacées ne seront pas concernées de manière démesurée. Nous sommes d'avis que l'installation de parcs éoliens sur des sites exposés à de fortes concentrations migratoires (catégories de risque jaune et orange) ne peut être envisagée qu'en liaison avec des mesures directes et préventives. Nous proposons que les projets de parc éolien dans des zones à forte intensité migratoire (zones orange) soient suspendus dans un premier temps, jusqu'à ce que des informations plus précises sur la corrélation entre l'intensité migratoire et le taux de collision soient disponibles. Des études locales supplémentaires s'avèrent notamment nécessaires dans l'arc alpin.

6. Mesures

Aucune mesure ne permet d'éviter complètement les collisions. Par rapport à la migration des oiseaux, il est néanmoins possible de réduire massivement le risque potentiel de collision par le biais d'un choix judicieux des heures de fonctionnement des éoliennes.

Une dissociation efficace de l'exploitation des installations et de l'activité migratoire des oiseaux permet de désamorcer notablement le conflit potentiel entre les oiseaux et l'énergie éolienne. Comme la migration s'effectue pratiquement à l'échelle nationale, sa séparation spatiale par rapport à la production d'énergie éolienne n'est réalisable que dans une mesure très limitée. Une dissociation plus efficace peut être obtenue sur l'axe temporel, si le lieu et l'heure des fortes concentrations migratoires sont connus. Comme les rotors immobiles constituent un risque de collision nettement moindre pour les oiseaux migrateurs, une mise hors service, limitée dans le temps, de certaines éoliennes peut entraîner une réduction considérable du danger potentiel.

Des mesures effectuées dans le cadre de notre travail de recherche nous ont appris par exemple que, durant la migration d'automne, sur un site voué à une forte intensité migratoire, 20% des oiseaux évoluaient à la hauteur d'éoliennes potentielles et 50% de ces oiseaux se répartissaient sur à peine 200 heures. En d'autres termes, si l'on connaît l'heure de survenance des concentrations migratoires dans le secteur des éoliennes et si l'exploitant est disposé à mettre hors service ses éoliennes en période de forte concentration, il est possible d'apporter une contribution majeure à la réduction du risque potentiel.

Pour y parvenir, il importe de mettre en place une surveillance permanente, aussi locale que possible, de la migration. Un système radar autonome, relativement simple et axé sur les oiseaux, par exemple, peut s'avérer efficace. Ainsi, en cas de migration intense, les éoliennes peuvent être déconnectées selon le lieu et l'heure. La définition de ces périodes de mise hors service requiert l'établissement d'une valeur seuil, effectué selon le principe de précaution. A nos yeux, et d'après les connaissances actuelles, il devrait se situer aux alentours de 50 oiseaux par heure et par kilomètre (cf. chap. 6.2 Taux de collision et calcul de la valeur seuil). Il importe que ce régime de mise hors service soit intégré dans l'autorisation d'exploitation et fasse l'objet d'un suivi. Le suivi revêt une importance capitale, car aucune mesure comparative directe n'est disponible en ce qui concerne les intensités migratoires et le nombre des victimes de collision. Seule une vérification régulière de l'impact permettra d'adapter la valeur seuil en fonction des conditions réelles.

Suivi

Un contrôle de l'impact des restrictions d'exploitation (mise hors service) s'avère surtout essentiel durant les premières années suivant la construction. Nos hypothèses et nos estimations concernant la définition d'une valeur seuil (chap. 6.2) méritent vérification. Nous estimons que nos évaluations du nombre de victimes de collision sont prudentes et favorables à la protection des oiseaux migrateurs. Il est donc possible que, sur la base de nouveaux acquis, cette valeur seuil soit révisée à la hausse et que d'autres sites puissent faire l'objet d'une exploitation rentable tout en tenant compte de la protection des oiseaux. Le suivi de l'impact permettra d'améliorer le système et d'optimiser les heures de mise hors service.

6.1 Surveillance de la migration

Une surveillance locale, permanente et automatique est aujourd'hui techniquement réalisable moyennant un budget raisonnable. Cette surveillance aurait pour objectif de mesurer l'intensité de la migration aviaire dans le secteur d'un parc éolien et non de contrôler les déplacements des oiseaux à proximité des éoliennes. Elle fournirait une base de données nécessaire à l'installation d'un système de mise hors service, fondé sur une valeur seuil visant à réduire les collisions et non à les éviter tota-

lement. Il suffit à cet effet de mesurer un échantillonnage représentatif du site en question. Des systèmes radar ont d'ores et déjà été installés sur divers sites de production d'énergie éolienne afin de surveiller la migration des oiseaux (en Espagne et sur la mer Noire, p. ex.).

6.2 Taux de collision et calcul de la valeur seuil

En guise de mesure de réduction du conflit entre migration aviaire et énergie éolienne, il convient de mettre les éoliennes hors service en période de forte migration. A cet effet, il faut définir une valeur seuil qui établisse à partir de quelle intensité migratoire il faut les mettre hors service. Les études sur la corrélation directe entre intensité migratoire et nombre de victimes de collision font actuellement défaut.

Pour la détermination de cette valeur seuil, nous avons analysé, à l'aide de mesures radar effectuées sur cinq différents sites de Suisse et d'Allemagne (lac de Constance), à quelle fréquence une certaine intensité migratoire (valeur seuil) était dépassée vers le haut ou vers le bas. Pour chaque valeur seuil, nous avons calculé la durée prévisible de mise hors service et le potentiel de risque subsistant (maximum de collisions possibles) en moyenne annuelle (fig. 29). Les mesures représentent en automne un total de 365 jours pour cinq sites (lac de Constance, Jura, Gothard, Alpes fribourgeoises et Alpes valaisannes) et au printemps 170 jours pour deux sites (Jura, Gothard). Les mesures ont été prises en permanence durant le jour et la nuit. Sur chaque site, l'intensité migratoire a été calculée à une altitude inférieure à 200 m au-dessus du sol sur une période de trois heures à chaque fois. Sur la base de ces valeurs moyennes établies sur 3 heures, la fréquence des dépassements de la valeur seuil a été évaluée au cours de la période de mesure. Pour la conversion annuelle, nous nous sommes fondés sur une période migratoire de 200 jours (printemps et automne).

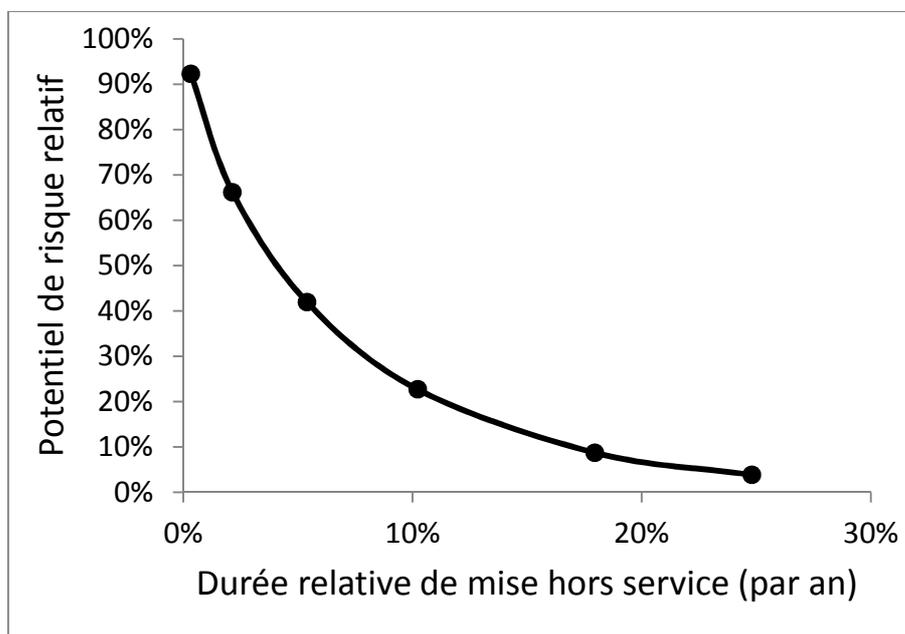


Fig. 29: Relation entre le potentiel de risque estimé et la durée de mise hors service escompté, sur la base des mesures effectuées sur cinq sites (cf. texte pour l'établissement de la courbe).

Pour le calcul du potentiel de risque, nous nous sommes fondés sur l'hypothèse que les oiseaux n'évitaient pas le parc éolien et que la vitesse de rotation n'avait aucune incidence sur le taux de collision. Cependant, il a été admis que les éoliennes hors service ne constituaient aucun risque de collision. Le potentiel de risque a été calculé à partir de l'intensité migratoire moyenne entre 0 et 200 m

au-dessus du sol et de la surface couverte par les pales d'une installation (575 m²). Le potentiel de risque se réduit à mesure que la valeur seuil diminue (fig. 30). En cas de mise hors service pour une intensité migratoire de 10 MTR (oiseaux par heure et par kilomètre), 97% de l'ensemble des collisions peuvent être évitées. Si la valeur seuil est fixée à plus de 100 MTR, moins de 50% des collisions seront évitées.

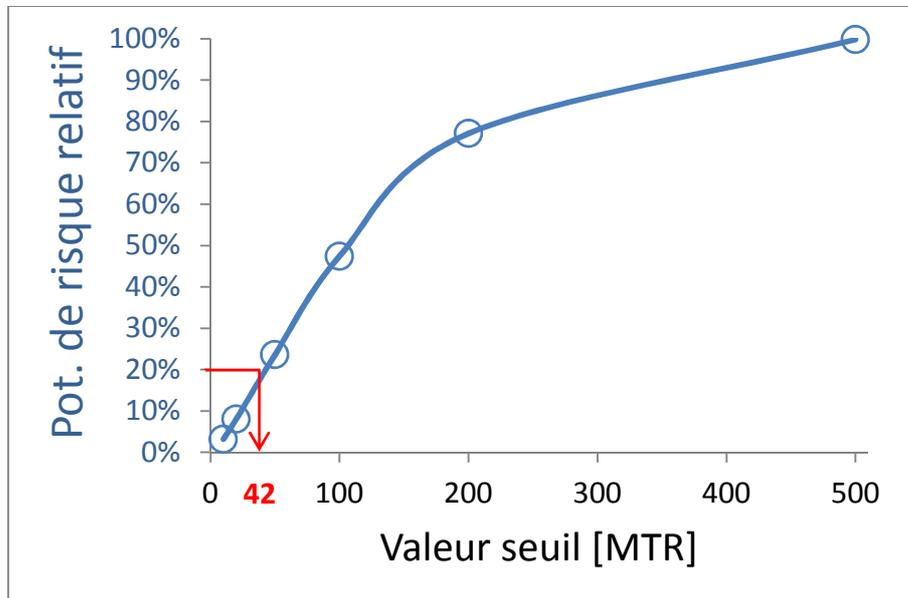


Fig. 30. La courbe indique l'accroissement du risque potentiel de collision en fonction d'une valeur seuil hypothétique fondée sur l'intensité migratoire effective. Lorsque la valeur seuil est atteinte, les éoliennes seraient mises hors service dans la zone de mesure (localement). La valeur seuil désigne l'intensité migratoire (nombre d'oiseaux par heure et par kilomètre), à une altitude de 0 à 200 m au-dessus du sol (MTR=migration traffic rate). En cas de valeur seuil de 42 MTR (rouge), 80% des collisions pourraient être évitées (cf. texte pour l'établissement de la courbe).

En valeur absolue, cela signifie que, pour une valeur seuil de 50 MTR (oiseaux par heure et par kilomètre), une centaine d'oiseaux seraient exposés au risque de collision. Les observations empiriques et les rares mesures effectuées sur des oiseaux de mer nous permettent d'établir qu'au moins 90% des oiseaux susceptibles en principe d'entrer en collision évitent l'obstacle selon une marge vaste ou réduite (Desholm 2006, p. ex.). Il en résulte, pour une valeur seuil de 50 MTR, un taux de collision prévisible de 10 oiseaux par an et par éolienne (fig. 31). Nous estimons que ce nombre de collisions est tolérable, dans un premier temps, par rapport à la migration aviaire et aux espèces et populations concernées. En même temps, nous considérons que, en Suisse, le nombre de 1000 éoliennes ne sera pas dépassé et que les espèces menacées ne seront pas affectées dans une mesure disproportionnée. La valeur seuil proposée a pour objectif que les collisions supplémentaires causées par les éoliennes n'aient pas pour effet d'accroître sensiblement le nombre de collisions déjà provoquées aujourd'hui par d'autres activités humaines (transports, bâtiments). D'après les mesures effectuées sur les sites mentionnés, cela impliquerait une restriction moyenne de 12% des heures d'exploitation des éoliennes. Selon nos estimations, les études intégrées dans l'évaluation de cette valeur moyenne portent majoritairement sur des sites présentant des volumes migratoires moyens voire supérieurs à la moyenne. La corrélation générale établie entre le potentiel de risque et la durée de mise hors service, telle qu'elle est présentée à la figure 31, s'avère donc plutôt conservatrice. Autrement dit, la durée de mise hors service devrait sans doute être inférieure en moyenne nationale.

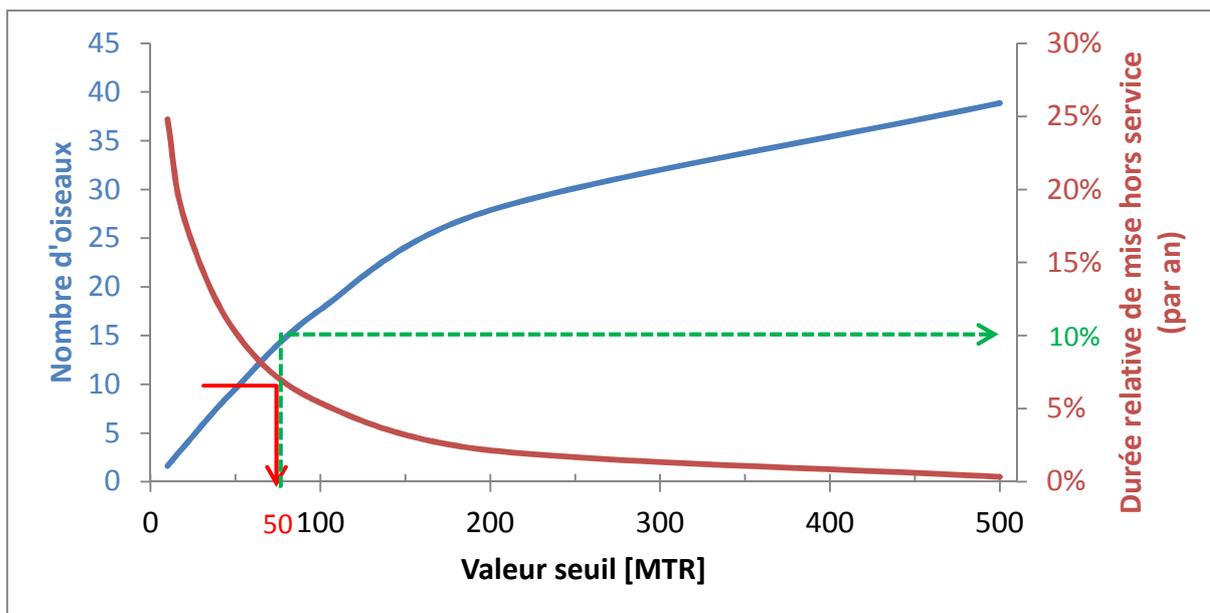


Fig. 31. La courbe bleue indique le nombre annuel absolu estimé de collisions contre une éolienne en fonction d'une valeur seuil hypothétique, définissant à quelle intensité migratoire une éolienne doit être mise hors service. La courbe rouge indique l'ampleur de la restriction d'utilisation (durée de mise hors service) par an. Pour la valeur seuil proposée de 50 MTR, le nombre moyen de collisions prévisibles est de 10 oiseaux par éolienne et par an, et la restriction moyenne d'utilisation serait de 10% (cf. texte pour l'établissement des courbes).

La figure 32 présente les différences entre les sites en matière de risque de collision et de durée de mise hors service. Pour trois des sites, les résultats de l'automne ont été extrapolés pour donner ceux du printemps, car aucune mesure de printemps n'était disponible. Il devrait en résulter une légère surestimation du nombre de collisions et des durées de mise hors service.

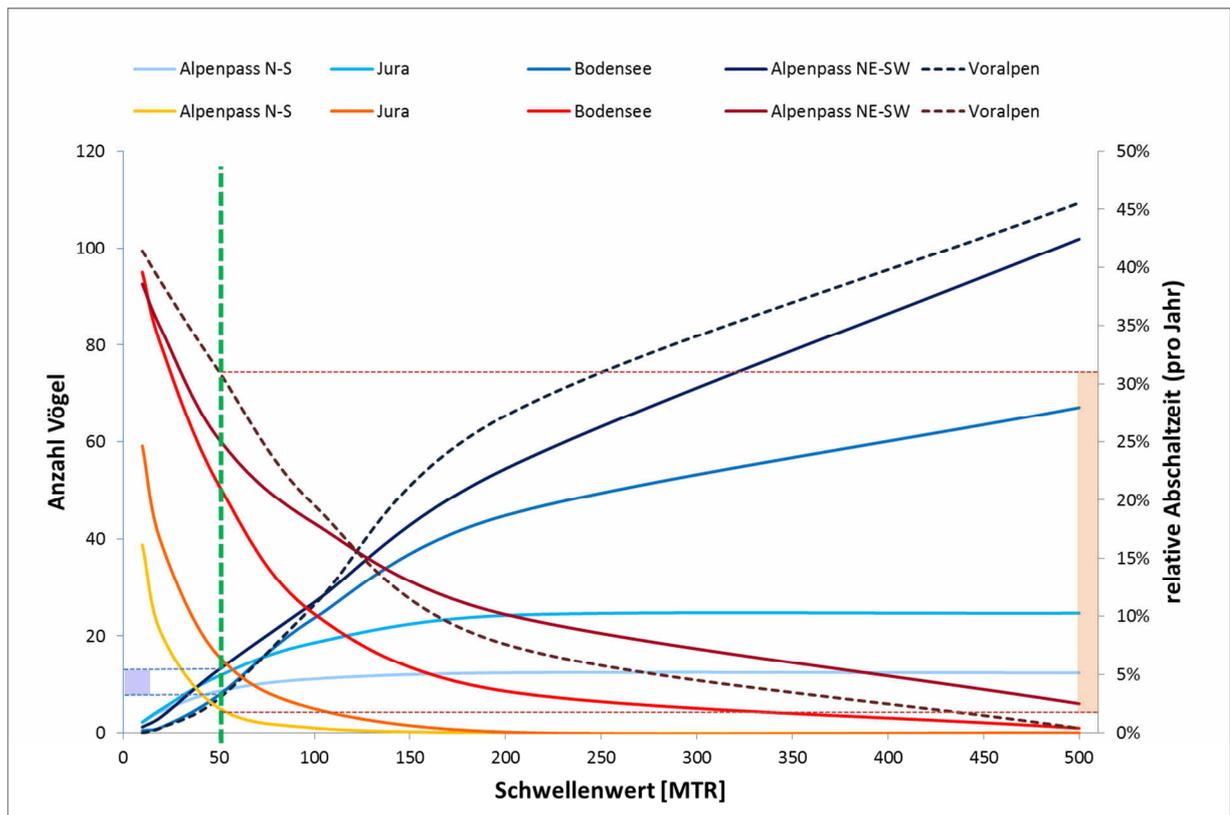


Fig. 32: Estimation du potentiel de risque annuel (courbes bleues) et des restrictions d'utilisation relatives escomptées (courbes jaunes/rouges) en fonction de la valeur seuil, sur les cinq sites étudiés (sur la base de 535 jours de mesures au total). Le champ bleu sur l'axe y à gauche indique la fourchette de collisions prévisibles par éolienne et par an, si l'éolienne est mise hors service en cas de dépassement de la valeur seuil de 50 MTR (oiseaux par heure et par kilomètre). Le champ rouge sur l'axe y à droite marque la zone de durée de mise hors service prévisible par éolienne et par an pour une valeur seuil de 50 MTR.

Concernant l'interprétation des estimations, il importe de tenir compte des aspects suivants :

- Le comportement d'évitement effectif des oiseaux (notamment en vol nocturne) est inconnu
→ Réduction ou accroissement du risque de collision
- La rotation des pales n'a pas été prise en considération
→ Accroissement de la mortalité lié à aux différences de pression et aux turbulences
→ Réduction du risque de collision si les oiseaux peuvent passer entre les pales
- Risque de collision avec des éoliennes immobiles
→ Accroissement du risque de collision
- Les fortes migrations ont surtout lieu par vent faible
→ Réduction de la perte de rendement

C'est sur la base de ces résultats qu'ont été définies les catégories de risque de la *Carte suisse des conflits potentiels entre l'énergie éolienne et les oiseaux : partie oiseaux migrateurs* (chap.5.1.)

7. Perspectives d'avenir

La Station ornithologique suisse aimerait désamorcer le conflit actuel dans le sens d'une mesure préventive, en proposant que les sites présentant une migration généralement forte ne fassent pas l'objet, dans la mesure du possible, de projets d'exploitation de l'énergie éolienne et que les éoliennes soient mises hors service dans l'ensemble des parcs éoliens si possible en cas de fortes densités migratoires. Afin de réduire autant que possible les périodes de mise hors service et le risque de collision, il serait nécessaire d'établir une prévision nationale de la migration aviaire, aussi précise que possible sur le plan temporel et géographique. En guise de variante, il serait aussi possible de mettre en place un dispositif de surveillance locale et automatique de la migration dans le secteur des parcs éoliens ; il permettrait de mesurer la migration en temps réel et de mettre les installations hors service en cas d'afflux de nombreux migrants. Si ce genre de dispositif de surveillance locale permettait de réaliser des mesures constantes de l'intensité migratoire, il serait possible d'en déduire une prévision dynamique du risque de collision pour le reste de la Suisse – sur la base de l'intensité migratoire locale et de la distribution altitudinale des oiseaux. Modèles, prévisions et mesures actualisées des conditions météorologiques et de la migration aviaire en seraient les composantes nécessaires. Notre objectif consiste à pouvoir indiquer, pour chaque site possible, dans quelle mesure le potentiel de menace peut être diminué si l'exploitation des éoliennes est réduite aux heures de forte intensité migratoire.

Un tel système de surveillance permanente de la migration aviaire ne revêt pas seulement de l'importance par rapport à l'exploitation de l'énergie éolienne. Dans le domaine de l'aéronautique (civile et militaire), il y a un intérêt réel à obtenir des informations sur la présence de concentrations migratoires. Elles permettraient de prendre des mesures appropriées pour réduire le nombre de collisions entre les avions et les oiseaux. En outre, ces données peuvent présenter un intérêt scientifique, susceptible de se révéler très importantes dans le cadre de l'évolution de la biodiversité (identification d'impacts climatiques, p. ex.). Le présent rapport regroupe les résultats d'une première étape vers l'établissement d'un système de prévision des migrations d'oiseaux, capable d'être actualisé, ajusté et amélioré en permanence, comme c'est le cas depuis longtemps pour les prévisions météorologiques.

8. Bibliographie

- Baumgartner, M. & B. Bruderer. 1985. Radarbeobachtungen über die Richtungen des nächtlichen Vogelzuges am nördlichen Alpenrand. *Ornithol. Beob.* 82: 207- 230.
- Bruderer, B. 1996. Vogelzugforschung im Bereich der Alpen 1980 – 1995. *Ornithol. Beob.* 93: 119-130.
- Bruderer, B. & F. Liechti. 1990. Richtungsverhalten nachziehender Vögel in Süddeutschland und der Schweiz unter besonderer Berücksichtigung des Windeinflusses. *Ornithol. Beob.* 87: 271-293.
- Bruderer, B. & F. Liechti. 1998. Intensität, Höhe und Richtung von Tag- und Nachtzug im Herbst über Südwestdeutschland. *Ornithol. Beob.* 95: 113-28.
- Bruderer, B. & F. Liechti. 2004. Welcher Anteil ziehender Vögel fliegt im Höhenbereich von Windturbinen? *Ornithol. Beob.* 101: 327-35.
- Bruderer, B., L.G. Underhill & F. Liechti. 1995. Altitude choice by night migrants in a desert area predicted by meteorological factors: *Ibis* 137: 44- 55.
- Desholm, M. Wind farm related mortality among avian migrants - a remote sensing study and model analysis. Dissertation Univ. Kopenhagen 2006.
- Erni, B., F. Liechti, L. Underhill, & B. Bruderer. 2002. Wind and rain govern the intensity of nocturnal bird migration in central Europe - a log-linear regression analysis. *Ardea* 90: 155-166.
- Horch, P., H. Schmid, J. Guélat & F. Liechti (2013) : Carte suisse des conflits potentiels entre l'énergie éolienne et les oiseaux : partie oiseaux nicheurs, hôtes de passage et réserves naturelles OROEM. Rapport explicatif, mise à jour 2013. Station ornithologique suisse, Sempach.
- Liechti, F. & B. Bruderer 1986. Einfluss der lokalen Topographie auf nächtlich ziehende Vögel nach Radarstudien am Alpenrand. *Ornithol. Beob.* 83: 35-66.
- Liechti, F., D. Peter, R. Lardelli, & B. Bruderer. 1996a. Die Alpen, ein Hindernis im nächtlichen Breitfrontzug – eine grossräumige Übersicht nach Mondbeobachtungen. *J. Ornithol.* 137: 337- 356.
- Liechti, F., D. Peter, R. Lardelli & B. Bruderer. 1996b. Herbstlicher Vogelzug im Alpenraum nach Mondbeobachtungen – Topographie und Wind beeinflussen den Zugverlauf. *Ornithol. Beob.* 93: 131- 152.
- Liechti, F. 2006. Birds: Blowin' by the wind. *J. Ornithol.* 147: 102-111.
- Mateos, M. & F. Liechti. 2011. How do diurnal long-distance migrants select flight altitude in relation to wind? *Behav. Ecol.* 23: 403-409.
- R Development Core Team 2011. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- Schmid, H., T. Steuri & B. Bruderer. 1986. Zugverhalten von Mäusebussard *Buteo buteo* und Sperber *Accipiter nisus* im Alpenraum. *Ornithol. Beob.* 83: 111- 134.
- USGS (1996): GTOPO30
URL http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/GTOPO30
- Zehnder, S., F. Liechti, B. Trösch & B. Bruderer. 2001. Gibt es topographie-unabhängigen Nachtzug über den Alpen? *Ornithol. Beob.* 98: 215- 222.

Annexe A

Distribution des directions d'oiseaux migrateurs dans des situations de vent différentes. Les parts des huit secteurs ont été estimées d'après la fig. 8 de Bruderer & Liechti (1990). La trajectoire de base choisie comme hypothèse était 225°, et la situation du vent répartie en quatre catégories. R_x correspond aux positions dans la matrice directionnelle (cf. 2.4 ; paramètre de modélisation direction-Weights).

		NO	N	NE	O	-	E	SO	S	SE
		R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	Z	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈
Vent contraire	< 5 m/s	0,010	0,250	0,577	0,001	NA	0,150	0,001	0,001	0,010
	5–10 m/s	0,010	0,141	0,307	0,001	NA	0,300	0,001	0,010	0,230
	10–20 m/s	0,001	0,001	0,010	0,001	NA	0,150	0,010	0,350	0,477
Vent latéral NO	< 5 m/s	0,001	0,184	0,630	1E-21	NA	0,184	1E-21	1E-21	0,001
	< 5 m/s	0,010	0,150	0,677	0,001	NA	0,150	0,001	0,001	0,010
	5–10 m/s	0,010	0,010	0,477	0,001	NA	0,470	0,001	0,001	0,030
	10–20 m/s	0,001	0,010	0,150	0,001	NA	0,677	0,001	0,010	0,150
Vent arrière	< 5 m/s	0,010	0,200	0,577	0,001	NA	0,200	0,001	0,001	0,010
	5–10 m/s	0,010	0,140	0,700	0,001	NA	0,137	0,001	0,001	0,010
	10–20 m/s	0,001	0,086	0,600	0,001	NA	0,300	0,001	0,001	0,010
Vent latéral SE	< 5 m/s	0,010	0,350	0,477	1E-21	NA	0,172	1E-21	1E-21	0,001
	< 5 m/s	0,010	0,350	0,477	0,001	NA	0,159	0,001	0,001	0,001
	5–10 m/s	0,120	0,450	0,387	0,010	NA	0,030	0,001	0,001	0,001
	10–20 m/s	0,100	0,777	0,100	0,010	NA	0,010	0,001	0,001	0,001

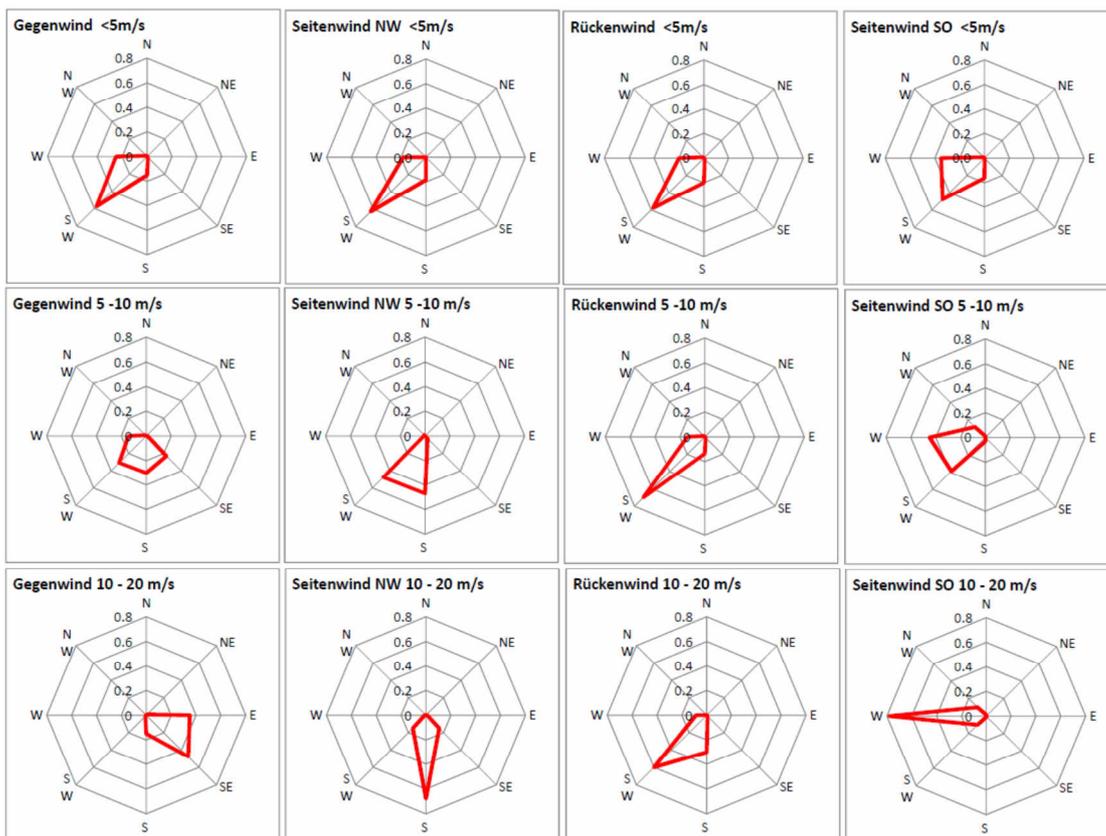


Fig. A1. Représentation graphique des paramètres extraits du tableau ci-dessus (Gegenwind = vent contraire, Seitenwind = vent latéral, Rückenwind = vent arrière ; NW = NO, SO = SE).

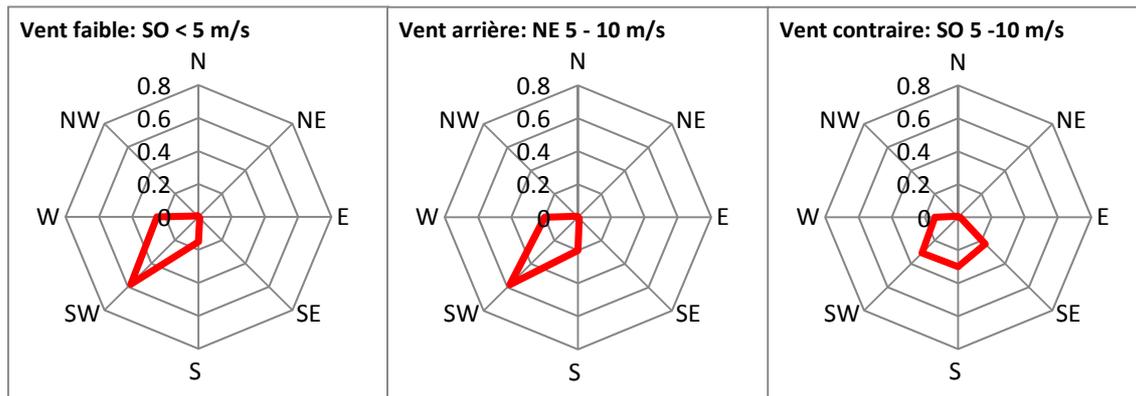
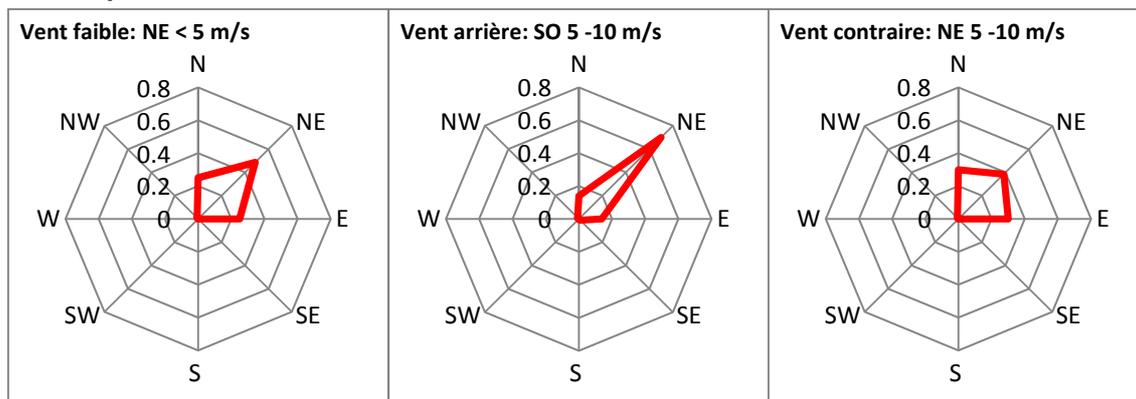
Automne**Printemps**

Fig. A2. Sélection de distributions de directions intégrées dans le modèle de calcul de la carte des conflits. Les graphiques représentent les trois situations de vent dans lesquelles la migration aviaire est surtout observée en automne et au printemps. Les graphiques présentent les probabilités selon lesquelles les oiseaux choisissent une des huit directions de vent possibles (paramètre de modélisation *directionWeights*). Les distributions de directions de l'automne correspondent aux observations de Bruderer & Liechti 1990. Dans le cas du vent contraire en automne, une distribution des directions a été choisie entre un vent < 5 m/s et 5–10 m/s, selon une pondération de 2:1 (cf. fig. A1). Les distributions des directions du printemps reposent sur des observations radar effectuées à Wideumont (NL), où les trajectoires de vol n'ont pas été influencées par la topographie (données personnelles non publiées).

Annexe B

Paramètres choisis pour la simulation des densités migratoires et des altitudes de vol dans les trois situations de vent où la majorité des oiseaux migrent.

	Vent faible	Vent arrière	Vent contraire
niter	700	700	700
bidrNb	100	100	100
aSigm	0.005	0.005	0.008
bSigm	200	300	200
flydown	10	0	30
initialHeight	100	200	100
direction Weights	Cf. annexe A, fig. A2		
fun	quantile3	quantile3	quantile3
rad	41	33	21