

Sommaire

1	Introduc	tion	1
2	Matériel	et méthode	2
	2.1 Mod	délisation du comportement	2
	2.1.1	Sites	2
	2.1.2	Matériel d'enregistrement	5
	2.1.3	Modèles comportementaux	8
	2.1.4	Asservissement des éoliennes	11
	2.1.5	Test d'asservissement	11
3	Résultat	s	19
	3.1 Dor	nnées des sites d'études	19
	3.1.1	Données Landes de Couesmé	19
	3.1.2	Donnes Tremblay	20
	3.1.3	Données des Hauts-Vaudois	21
	3.1.4	Synthèse de l'activité sur les trois sites	22
	3.2 Mod	dèles comportementaux	24
	3.2.1	Paramètres climatiques	24
	3.2.2	Paramètres temporels	26
	3.2.3	Asservissement	26
	3.3 Mor	talité	28
	3.3.1 chauves	Effet de la régulation du fonctionnement des machines sur la mortalité souris	
	3.3.2	Effet sur la mortalité en fonction de l'indice d'activité (nombre de con	
	acoustiq	ue)	
	3.3.3	Comparaisons interannuelles	
4	Discussi	on	32
		scription de l'activité des chauves-souris sur les sites des landes de Coue ay et des Hauts-Vaudois	
	4.1.1	Activité en fonction de la vitesse du vent	32
	4.1.2	Activité en fonction de la température	33
	4.1.3	Modèles de comportement	33
	4.2 Sys	tème de pilotage des éoliennes	34
	4.3 Tes	t du système de pilotage sur le parc de Bouin	35
	4.3.1	Comparaison inter-machine et inter-période	35
	4.3.2	Comparaisons interannuelles	35
	4.4 Lim	ites de l'étude	37
	4.4.1	Limites de la détermination des indices d'activité	37
	4.4.2	Limites du modèle et de son extrapolation à Bouin	38
	4.4.3	Limites du suivi de mortalité	39

5	Cond	clusio	on et perspectives	40
Ę	5.1	Colle	ecte des informations	40
Ę	5.2	Réal	lisation des modèles comportementaux	40
Ę	5.3	Réal	lisation du système d'asservissement	40
Ę	5.4	Valid	dation de l'efficacité du dispositif	40
Ę	5.5	Con	solidation de la validation - répétition des essais	41
	5.5.	1	Sur le parc de Bouin	41
	5.5.	2	Sur d'autres sites	41
	5.5.	3	Amélioration du protocole de suivi	41
	5.5.	4	Développement de nouveaux outils	41
6	Bibli	ogra	phie	43
An	nexe .			45

Préambule

Ce rapport technique est à destination :

- du comité technique Chirotech
- de l'ADEME (rapport de validation du dispositif Chirotech)

1 Introduction

Le développement des énergies renouvelables constitue l'un des chalenges à mener pour nous émanciper des énergies fossiles. En France, l'énergie éolienne nous a déjà fourni 7,8 TW/h sur l'année 2009 avec 2600 éoliennes installées. Il en faudra deux fois plus en 2020 pour répondre aux objectifs du Grenelle de l'environnement. Ce développement peut poser des problèmes environnementaux, notamment vis-à-vis des chiroptères.

En effet, des premiers cas de mortalité de chauves-souris induits par les éoliennes ont été rapportés dès les années 70 (Hall & al.1972). Depuis, en Europe, les programmes de suivis permettent de constater que certaines espèces de chiroptères sont régulièrement impactées, avec de fortes variations entre les sites étudiés. En France, les éoliennes les plus meurtrières pourraient tuer jusqu'à une centaine d'individus par an.

Le programme de recherche Chirotech a pour objectif de tenter de concilier la préservation des chiroptères et le développement de l'énergie éolienne. Ce programme a été initié en 2006 par Biotope, sur la base d'une idée formulée en 2003 par T. Dürr : imposer des arrêts ponctuels dans le fonctionnement des machines, lors de périodes de forte activité des chauves-souris, pourrait permettre d'éviter une large part de la mortalité constatée.

La faisabilité économique de cette hypothèse a été validée par Armoise en 2005 (résultats consignés dans une enveloppe Soleau déposée en janvier 2006).

Depuis, des systèmes basés sur une élevation du seuil de vitesse de vent nécessaire au démarrage des éoliennes ont été testés au Etats-Unis (Arnett & Schirmacher, 2009; Baerwald *et al.* 2009) Le passage d'une vitesse de vent de démarrage de 3,5 m.s⁻¹ à 5,5 m.s⁻¹ permettrait de réduire la mortalité de 60 à 80 %.

Chirotech a pour ambition de proposer un système intégrant l'ensemble des paramètres influençant l'activité des chauves-souris, en vue d'un asservissement plus précis permettant à la fois de diminuer encore la mortalité tout en permettant de réduire les pertes de production.

Pour atteindre cet objectif d'une conciliation de production et de préservation, Chirotech propose :

- De collecter des données de comportement des chauves-souris en fonction des paramètres climatiques, des cycles annuels et des cycles journaliers.
- De réaliser des modèles comportementaux des chiroptères en fonction de ces paramètres
- De réaliser un dispositif de pilotage des éoliennes capable d'arrêter les éoliennes lorsque le modèle comportemental prévoit une forte activité des chauves-souris
- De vérifier les performances du système sur une série de parcs pilotes.

Ce process a fait l'objet d'un dépôt de brevet en Août 2009.

L'objectif de ce document est de présenter :

- l'ensemble de la méthodologique qui nous a permis de construire les modèles comportementaux.
- de décrire succinctement la manière dont ces modèles de comportement ont été utilisés pour réguler un parc éolien,
- de présenter les variations de mortalités qui ont été observées au cours de la période de régulation d'un parc éolien,
- de présenter les perspectives ouvertes par ces premiers résultats.

Le projet Chirotech, porté par Biotope et Nordex, est soutenu par l'Ademe, Oséo et la Région Languedoc-Roussillon.

2 Matériel et méthode

2.1 Modélisation du comportement

2.1.1 Sites

Depuis 2006, le programme de recherche Chirotech a permis d'instrumenter dixhuit sites (convention ADEME) avec des systèmes d'enregistrement automatiques collectant l'indice d'activité des chauvessouris en fonction des conditions météorologiques, des cycles annuels et des cycles journaliers.

Le parc éolien de Bouin (Fig. 1) a été choisi pour tester l'efficacité du système en réalisant, sur l'année 2009 une première session de régulation de fonctionnement des machines accompagnée d'un suivi de mortalité au sol.



Figure 1: plan de situation du parc éolien de Bouin, des projets de parcs des Landes de Couesmé, de Tremblay et des Hauts Vaudois.

Ce choix résulte de la combinaison de deux facteurs :

- La présence de machines développées par notre partenaire Nordex.
- L'existence d'un suivi de mortalité ornithologique relativement constant (financé par la région Pays-de-la-Loire, l'ADEME et réalisé par la Ligue de Protection des Oiseaux LPO) depuis la mise en exploitation du parc (Juin 2003).

Comme nous ne disposions pas d'enregistrements d'activité de chauves-souris exploitables sur le site de Bouin, nous avons décidé de construire un modèle d'activité basé sur les données provenant de trois autres sites situés dans le quart nord-ouest de la France (Landes de Couesmé, Tremblay et Hauts-Vaudois) (Fig. 1).

2.1.1.1 Site des landes de Cousemé

Le projet de parc des Landes de Couesmé est situé dans le Morbihan, à proximité de la commune de La Gacilly. Les Landes de Couesmé forment l'extrémité nord d'un ensemble de crêtes regroupées sous le nom de Landes de Lanvaux. Sur l'emprise du futur parc, le développement progressif de cultures intensives et surtouts de boisements ne laisse plus que des lambeaux de landes.

Le mât de mesure (25 m) est implanté dans un bosquet de pins bordé de cultures et de boisement mixtes, sur le flanc sud des landes (Fig. 2).

Les systèmes d'enregistrement ultrasonores et météorologiques ont permis de fournir un jeu de données complet du 09/08/2007 au 04/11/2007.

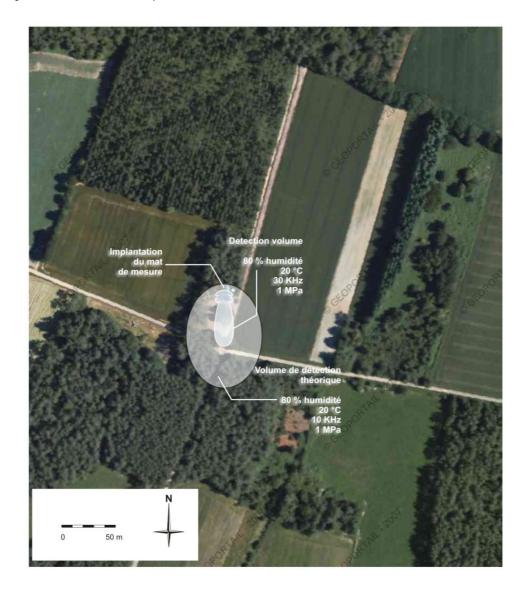


Figure 2 : implantation du mât de mesure des Landes de Couesmé

2.1.1.2 Site des Hauts-Vaudois

Le projet de parc des Hauts-Vaudois est situé à l'ouest du village de Sentilly dans l'Orne, dans la plaine agricole d'Alençon et d'Argentan.

Le mât de mesure est implanté sur une grande culture bordant un complexe bocager à l'est et des milieux plus ouverts à l'ouest (Fig. 3).

Les systèmes d'enregistrement ultrasonores et météorologiques ont permis de fournir un jeu de données complet du 26/07/2006 au 26/07/2007.

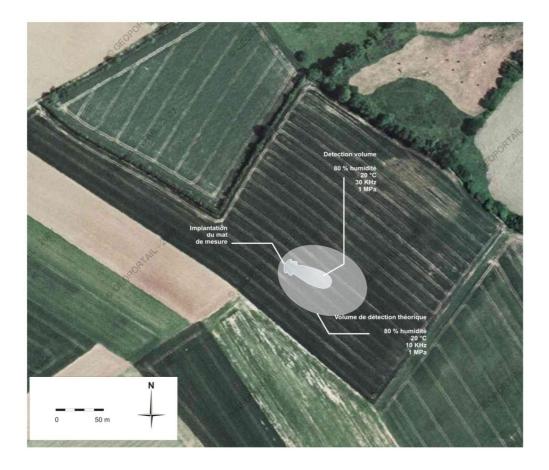


Figure 3 : implantation du mât de mesure des Hauts-Vaudois

2.1.1.3 Tremblay

Le projet de parc éolien de Trembay est situé au sud du village de Tremblay dans l'Illeet-Vilaine. Ce site s'inscrit au sein d'un paysage de polyculture – élevage où alternent les prairies permanentes, cultures et prairies temporaires réticulées par un maillage bocager assez dense.

Le mât de mesure est implanté sur une grande culture intégrée dans ce complexe bocager (Fig. 4).

Les systèmes d'enregistrement ultrasonores et météorologiques ont permis de fournir un jeu de données complet du 01/08/2008 au 31/07/2009, sans enregistrements de température.

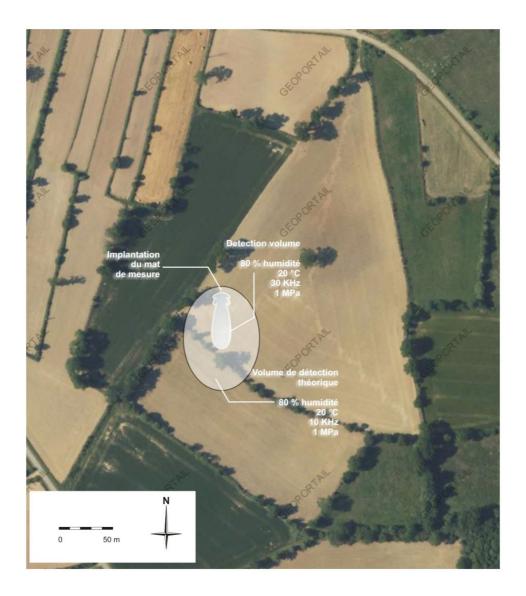


Figure 4 : implantation du mât de mesure de Tremblay

2.1.2 Matériel d'enregistrement

L'enregistrement en altitude (hauteur de fonctionnement des éoliennes) a été réalisé grâce à des dispositifs d'enregistrement ultrasonores (Anabat) complétés par un système d'alimentation autonome, le tout installé sur des mats de mesure ou des éoliennes dans le cas du suivi d'activité sur le parc éolien de Bouin.

2.1.2.1 Anabat

Le système choisi pour réaliser la quantification de l'activité des chauves-souris repose sur les systèmes Anabat développés par Chris Corben et commercialisés par Titley. Ils sont constitués d'un système de numérisation relié à un microphone capacitif, l'ensemble fonctionnant sur une plage de fréquence allant de 20 à 200 kHz. L'enregistrement des données est déclenché automatiquement lorsque le niveau sonore détecté par l'appareil dépasse un seuil fixé par l'utilisateur (de 1 à 8). Les sons sont échantillonnés en division de fréquence (zéro crossing), principe consistant à enregistrer un point à la fréquence portant le maximum d'énergie, pour chaque échantillon (fréquence d'échantillonnage de 8,50 kHz en mode div. ratio = 8). L'indice d'activité des chauves-souris correspond au

nombre de fichiers identifiés comme étant des sons de chauve-souris, par unité de temps. Deux modèles d'Anabat ont été utilisés.

Anabat II

Ce dispositif a été utilisé sur la période 2006-2007 sur le site des Haut Vaudois. Il ne permettait pas l'enregistrement des sons, mais avait été modifié de manière à enregistrer le nombre de détections. Les modifications (extraction du signal et stockage sur datalogger) ont été réalisées par les sociétés Altys et Tétraèdre. Ce dispositif ne permet qu'un stockage quantitatif de l'information collecté (nombre de contacts).

Anabat SD I

Ce dispositif a été utilisé sur tous les sites instrumentés à partir de 2007. Il permet le stockage des fichiers correspondant aux sons sur une carte Compact Flash. Ce dispositif permet à la fois un stockage qualitatif de l'information (fichiers division de fréquence) et quantitatif (nombre de fichiers).

2.1.2.2 Microphone déporté

Pour faciliter la maintenance des dispositifs d'enregistrement, l'Anabat est placé à la base du mât de mesure (2 à 3 m de haut) pour pouvoir remplacer les cartes de stockage et éventuellement changer des pièces défectueuses.

Pour échantillonner correctement l'activité en altitude, le microphone est déporté en haut du mât de mesure, dans un boîtier spécifique (Fig. 5), grâce à un câble blindé. Les premiers montages ont été réalisés par la société Altys puis repris en interne par Biotope avec sous-traitance de l'usinage des pièces mécaniques à la société Doffin. Les microphones utilisés sont les microphones standards livrés avec l'Anabat.

2.1.2.3 Alimentation

L'alimentation de l'Anabat ou de l'ensemble Anabat / datalogger est réalisée par un panneau solaire de 45 Wc sous 12 V chargeant une batterie tampon de 7 Ah⁻¹ sous 12 V par l'intermédiaire d'un régulateur de charge autorisant simultanément la charge de la batterie et l'alimentation de l'Anabat. L'ensemble Anabat (+ datalogger) / batterie / régulateur est placé dans un boitier IP65. Dans le cas de l'installation dans une éolienne, l'alimentation est réalisée par le circuit 240 V / 50 Hz de la machine après transformation en 12 V continu.

2.1.2.4 Anti-parasitage

La protection contre les parasitages électromagnétiques (ondes hertziennes, champs électromagnétiques de l'alternateur dans les éoliennes...) est réalisée grâce à la construction d'une cage de Faraday continue autour de l'ensemble microphone / câble / Anabat / alimentation. Dans le cas d'une alimentation par le circuit électrique d'une éolienne, le courant d'entrée de l'Anabat est filtré par un pont de diode couplé à un condensateur et une résistance, à l'entrée de la cage de Faraday.

2.1.2.5 Mât de mesures

Sur les sites d'étude préalable, le dispositif est installé sur les mats de mesures fournis par le développeur éolien. Pour les trois sites exploités par cette étude, il s'agit de mats treillis (composés de tubes triangulés) haubanés, de 25 à 50 m de haut (Fig. 5).

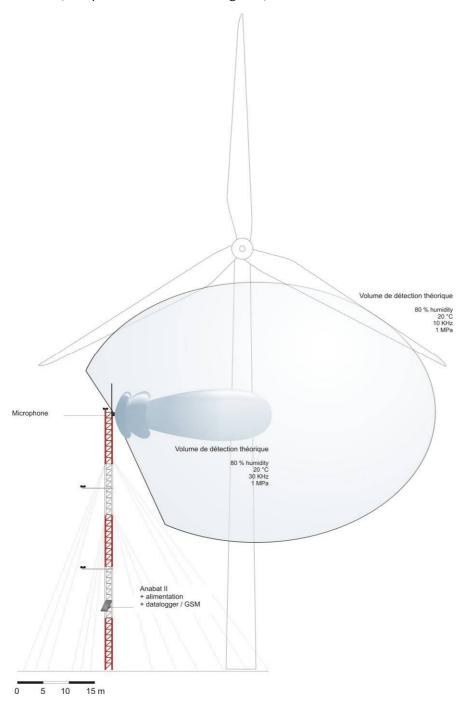


Figure 5 : Représentation schématique de l'installation d'un dispositif d'enregistrement Chirotech sur un mât de mesure (40 m) indiquant les proportions du volume échantillonné par rapport aux dimensions d'une éolienne de 2,5 kw à 80m de haut. Le volume échantillonné varie en fonction de la fréquence, des conditions de température et de pression. Deux volumes de détection sont présentés pour deux fréquences sous des conditions de température et de pression constantes.

2.1.2.6 Stations météorologiques

Les données météorologiques (vitesse du vent, direction du vent, température et hygrométrie) sont transmises par les développeurs de chacun des projets de parc éolien. Elles sont organisées sous forme d'une mesure moyenne de chaque paramètre toutes les dix minutes. Ces moyennes sont utilisées pour réaliser des moyennes horaires qui sont ensuite exploitées dans les différentes analyses.

2.1.3 Modèles comportementaux

2.1.3.1 Vitesse du vent

Des classes de vitesses de vent sont définies de manière à exploiter plus facilement les données. Ces plages sont définies de la manière suivante :

$$0 \text{ m.s}^{-1} \text{ à } 0,49 \text{ m.s}^{-1}$$
; $0,5 \text{ m.s}^{-1} \text{ à } 0,99 \text{ m.s}^{-1}$; ...; $19,5 \text{ m.s}^{-1}$ à $19,99 \text{ m.s}^{-1}$

Sur chaque site, l'activité des chauves-souris est ensuite regroupée en fonction des classes de vitesse de vent. Ce regroupement s'opère en additionnant le nombre de contacts ultrasonores sur chaque classe de vitesse de vent, puis en divisant ce nombre de contacts par le nombre d'occurrences (d'une heure) de cette classe entre le lever et le coucher du soleil, sur la totalité de l'année.

$$I_{v\,0-0.49} = \frac{\sum_{v=0}^{v=0.49} I}{\sum_{v=0}^{v=0.49} n}$$

I_v correspond au nombre de contacts sur une heure

n correspond au nombre d'heures

 $I_{0-0,49}$ correspond alors au nombre de contacts par heure enregistrés pour des vitesses de vent allant de 0 à 0,49 m.s⁻¹.

L'activité théorique en fonction de la vitesse du vent est obtenue sur grâce à un modèle mathématique décrit dans la version confidentielle.

2.1.3.2 Température

Des classes de températures sont définies de manière à exploiter plus facilement les données. Ces classes sont définies de la manière suivante :

Sur chaque site, l'activité des chauves-souris est ensuite regroupée en fonction des classes de température en additionnant le nombre de contacts ultrasonores sur chaque classe de température, puis en divisant ce nombre de contacts par le nombre d'occurrences de cette classe entre le lever et le coucher du soleil, sur la totalité de l'année.

$$I_{t0-1.9} = \frac{\sum_{c=0}^{t=1.9} I}{\sum_{c=0}^{t=1.9} n}$$

 I_t correspond au nombre de contacts sur une heure

n correspond au nombre d'heures

 $I_{0\text{-}0,49}$ correspond alors au nombre de contacts par heure enregistrés pour des températures allant de 0 à 1,9 °C.

L'activité théorique en fonction de la température est obtenue sur grâce à un modèle mathématique décrit dans la version confidentielle.

L'activité théorique des chauves-souris en fonction de la vitesse du vent et de la température est ensuite décrite par un score vent-température S_{vt} obtenu en multipliant l'activité théorique en fonction de la vitesse du vent et l'activité théorique en fonction de la température :

$$S_{vt} = A_t \cdot A_v$$

Pour évaluer l'activité théorique des chauves-souris sur le site de Bouin sur les années 2005, 2006, 2007 et 2008 puis la comparer à l'activité théorique des chauves-souris sur l'année 2009, les scores vent-température Svt ont été calculés toutes les 10 minutes, entre le lever du soleil et le coucher du soleil, entre le 1^{er} janvier 2005 et le 31 décembre 2009, sur la base des relevés météorologiques des éoliennes 4, 5, 6, 7 et 8. Ces données météorologiques nous ont été transmises par Nordex.

Le résultat correspond à la somme des périodes nocturnes favorables à l'activité des chauves souris, à la fois vis-à-vis des conditions de vent et des conditions de température.

Les scores vent-température ont été sommés pour chacun des mois des 5 années d'étude, puis un score moyen par mois a été réalisé en moyennant les scores des 5 machines.

Par exemple:

$$\boldsymbol{S_{vt012005M4}} = \sum_{T0}^{Tf} \boldsymbol{S_{vtnocturnes}}$$

Svt012005M4 : somme des Svt nocturnes pour le mois 1 (janvier 2005) sur la machine 4

T0: 1er janvier 2005

Tf: 31 janvier 2005

$$S_{vt012005} = \frac{\sum_4^8 S_{vt012005M}}{5}$$

Svt012005 : moyenne sur les machines 4 à 8 des Svt nocturnes cumulés sur janvier 2005.

Svt01m: moyenne 2005-2008 des Svt nocturnes cumulés sur janvier

Svt01 : Svt nocturnes cumulés sur janvier 2009

2.1.3.3 Cycles journaliers et annuels

Visualisation des variations d'activité en fonction de la date et de l'heure

L'analyse des variations d'activité des chiroptères en fonction de la date et de l'heure est proposée en transformant la matrice regroupant l'indice d'activité par heure et par date en image. Les abscisses représentent les jours calendaires (de 0 à 365) et les ordonnées représentent les heures (de 12 à 24 puis de 0 à 11 pour centrer la nuit au milieu du graphique). Le codage de l'indice d'activité se fait par variation de luminosité de chaque pixel dans l'image :

- Une heure sans activité est représenté par un pixel noir (Vpxmin = 0)
- Une heure présentant un indice d'activité maximal Imax est représenté par un pixel blanc (Vpxmax = 255)
- Une heure présentant un indice activité I est représenté par un pixel gris de valeur
 Vpx = Vpxmax * I / Imax

Pour faciliter la lecture de l'image, cette dernière est floutée avec un filtre gaussien puis colorisée en faisant correspondre chaque valeur de niveau de gris à une valeur de couleur codée en RVB.

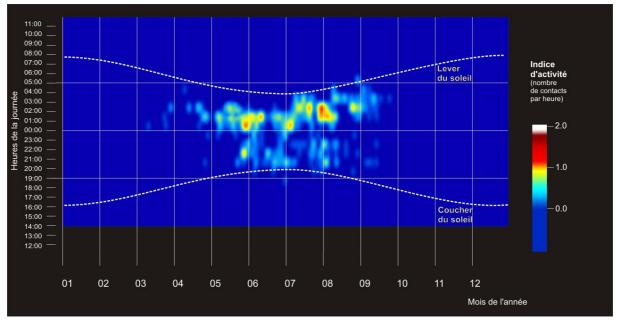


Figure 6 : représentation de l'activité des chauves-souris en fonction de la date et de l'heure

Modèles d'activité en fonction de la date et de l'heure.

Ces modèles ne sont pas utilisés dans les résultats présentés. Ils interviennent uniquement dans le système informatique d'asservissement , ils ne sont donc pas détaillés dans ce rapport.

2.1.3.4 Modèle

Le modèle d'activité multifactoriel est ensuite construit en combinant l'ensemble des descripteurs mathématiques obtenus précédemment. Ce modèle est utilisé pour l'asservissement des éoliennes mais n'intervient à aucun moment dans les calculs présentés dans cette étude. Ni sa mise au point ni les équations résultats ne seront donc présentés. Le tableau récapitulatif des alertes et des arrêts effectifs est présenté §3.2.3.

2.1.4 Asservissement des éoliennes

L'asservissement des 5 éoliennes test a été réalisé de la manière suivante :

- Les données météorologiques (vitesse du vent, direction du vent, température) locales (Bouin, Vendée) ont été collectées sur les 5 éoliennes test, toutes les minutes par les stations météorologiques installées sur les éoliennes.
- Les données locales ont été collectées par le serveur de Biotope à Mèze (Hérault) par une connexion internet
- Ces données ont été moyennées, par machine, pour obtenir une moyenne flottante sur 10 minutes sur le serveur de Biotope
- Les moyennes flottantes ont été entrées dans le modèle mathématique sur le serveur de Biotope.
- Les résultats du calcul ont déterminé la présence potentielle de chauves-souris (probabilité calculée de 0 à 100%) au cours de l'heure à venir et si cette présence était supérieure à un seuil fixé empiriquement à 20 %, un mail d'alerte a été envoyé à destination d'un automate sur le parc de Bouin.
- L'automate a déclenché l'arrêt des machines ou leur redémarrage en fonction des données contenues dans le mail envoyé par le serveur de Biotope.
- Le contrôle du fonctionnement du dispositif a été mis en place par un opérateur.

2.1.5 Test d'asservissement

2.1.5.1 Le parc éolien

Le test d'asservissement a été conduit sur le parc éolien de Bouin. Ce parc est implanté sur les polders du Dain, en retrait des parcs ostréicoles de Bouin. Les machines sont espacées en moyenne de 250 m sur une courbe de 2,5 km de long, globalement orientée nord-est / sud-ouest (Fig. 7). Ses grandes caractéristiques sont résumées dans le tableau 1.

Type de machine	N80 / 2400 (Nordex)		
Exploitants	EDF – EN (5 machines)		
	REVe (3 machines		
Puissance installée	19,5 MW		
Production annuelle estimée	41 GW.h ⁻¹		



Figure 7: Parc éolien de Bouin, implantation des machines.

2.1.5.2 Suivi de mortalité des chiroptères

Le suivi de la mortalité au sol a été réalisé par la « LPO Vendée » dans le cadre d'une sous-traitance pour Biotope.

Principe de la méthode d'estimation de la mortalité des chiroptères

La méthode choisie est celle proposée par J.E Winkelman (1989, 1992). Le nombre total de chauves-souris tuées par les éoliennes est égal au nombre de chauves-souris trouvées mortes (et dont la cause de la mort est imputée aux éoliennes), corrigé par des coefficients d'erreur déterminés au préalable, liés à l'efficacité de la découverte des cadavres et au taux de disparition des cadavres (prédation, enfouissement suite à des labours, dégradation complète par les insectes nécrophages...).

Ceci se traduit par la formule suivante :

Nestimé = (Na-Nb)/(P*Z*O*D)

Na: nombre total de chauves-souris mortes trouvées dans le cadre du suivi,

Nb: nombre de chauves-souris tuées par autre chose que les éoliennes (nombre de cadavres ne présentant pas les symptômes d'une mort par collision ou projection),

P: taux de disparition des cadavres sur le site

- si sur 10 cadavres 2 disparaissent en 1 semaine, P= 0,8 (pour un pas de temps choisi d'une semaine)

- si 5 cadavres disparaissent en 3 semaines, P= 0,5 (pour une pas de temps choisi de 3 semaines)

Il est important de choisir le temps d'intervalle des recherches assez court de façon à ce que P soit le plus proche possible de 1. Pour Bouin, le pas de temps est de 1 semaine (cf. ci-après),

Z: efficacité de recherche de l'observateur: pour 8 cadavres retrouvés sur 10, Z=0,8,

O : surface prospectée ou le nombre d'éoliennes surveillées,

D : nombre de jours de recherche. Il s'agit donc d'un temps qui est difficilement extrapolable à l'année tant les conditions (biologiques et climatiques) sont variables. D est fonction de P,

Par exemple:

Si un suivi est fait toutes les semaines au mois de juin sur l'ensemble du parc et que P=1 (pour une semaine) et Z=0,9 et si 3 cadavres liés aux éoliennes sont trouvés :

Nestimé = 3/(1*0.9) = 3.33 chauves-souris mortes pour huit éoliennes au mois de juin soit 0,41 chauves-souris par éolienne au mois de juin. Nestimé est donc exprimé en nombre de chauves-souris tuées par les éoliennes sur un pas de temps défini et pour une surface définie.

Détails de la méthode de recherche mis en place par la LPO

Les prospections s'effectuent à pied, dans un carré de 100 mètres de côté autour d'une éolienne. Le pas de temps choisi est d'une semaine. Il s'agit d'un compromis entre les moyens humains, techniques et financiers, et la nécessité de retourner sur le site le plus souvent possible pour éviter les biais de disparition des cadavres.

Pour réaliser une prospection complète, une matérialisation au sol avec des piquets sous forme d'un quadrillage peut aider les prospecteurs à se déplacer de façon régulière sous les éoliennes (surtout du côté est dans les champs). Cette matérialisation (pérenne) ne peut s'effectuer que hors des périodes de fauche dans les polders ou bien en plaçant les piquets entre les parcelles (dans les fossés) lorsque les céréales sont hautes. Les piquets sont posés à une distance de 25 mètres chacun sur une longueur de 100 mètres (correspondant à la hauteur d'une éolienne). La prospection s'effectue de part et d'autre des lignes matérialisées par ces piquets.

La distance parcourue lors de ce suivi est de 900 mètres pour chaque éolienne, soit une distance de 7,2 km pour la prospection sous les 8 éoliennes (cf. schéma ci-dessous).

Une journée est nécessaire pour réaliser la prospection sous les 8 éoliennes (1 ha par éolienne). Lorsque toute la surface n'est pas accessible (végétation trop haute, semis récent ne permettant pas de pénétrer dans les parcelles...), l'observateur note la surface qu'il a pu prospecter, afin d'appliquer ensuite un facteur de correction.

Les résultats sont notés sur une fiche appelée Fiche Terrain mortalité qui doit être remplie et numérotée pour chaque cadavre découvert. Cette fiche comprend en particulier :

- l'identification de l'espèce (autant que possible),
- l'état apparent du cadavre (croquis, une zone sur la fiche est prévue à cet effet),

- la localisation précise de la découverte (n° de l'éolienne concernée + coordonnées GPS),
- la cause présumée de la mort (en fonction de l'espèce, de son état apparent et de sa localisation par rapport aux obstacles présents).

Le cadavre est photographié (2 ou 3 photos par cadavre).

Détermination des coefficients d'erreurs

Des cadavres leurres (oiseaux) sont utilisés pour déterminer les coefficients P et Z, propres au site et à l'observateur. Ces leurres sont disposés par une personne différente de l'observateur habituel.

Détermination de P : disparition des cadavres

Le lendemain du dépôt de cadavre, et une autre fois au bout d'une semaine (pas de temps choisi pour ce site), les cadavres déposés sont recherchés. Le nombre de cadavres retrouvés par rapport au nombre déposé correspond au taux de disparition. Il varie en fonction de la saison (notamment en fonction de la disponibilité en proies vivantes pour les prédateurs qui peuvent parfois s'avérer charognards).

Détermination de Z : efficacité de recherche

Tout de suite après le dépôt des cadavres leurres, l'observateur habituel effectue son protocole de recherche de mortalité. Le nombre de carcasses découvertes par rapport au nombre de carcasses déposées constitue le taux de découverte. Ce coefficient varie en fonction du couvert végétal et de la taille de la chauve-souris. Il est donc spécifique à la période de l'année, à la nature du couvert végétal et à la taille des animaux. En été, les cultures étant sur pied, Z sera plus faible, sauf pour certaines cultures comme la luzerne, qui est coupée en mai et peut être plus haute en hiver. En hiver, dans les labours, Z devrait être plus proche de 1.

Pour prendre en compte les effets de saisonnalité, au moins 4 dépôts de cadavres-leurres sont réalisés dans l'année (un par saison).

La détermination des coefficients d'erreur P et Z est délicate. En effet, ils varient considérablement en fonction de nombreux paramètres extérieurs (nombre de charognards sur le site, accoutumance des prédateurs, couverture végétale, fréquentation touristique, période de chasse, météo, taille des cadavres...). La détermination de ces coefficients a été améliorée au cours des 4 années de suivi.

2.1.5.3 Protocole et test statistiques

Pour tester si l'asservissement des éoliennes induit une diminution de mortalité des chauves-souris, le protocole expérimental que nous avons employé est un protocole BACI (Before-After Control-Impact). Ce type de protocole est classiquement utilisé dans les études d'impact en environnement et permet de tester sans ambiguïté l'effet de l'impact d'un aménagement. Dans cette étude, nous avons considéré que l'asservissement des éoliennes constitue une forme d'aménagement et nous avons testé l'impact de l'asservissement sur la mortalité des chauves-souris. Lorsque l'installation d'un aménagement est susceptible de produire un impact sur l'environnement alentour, le protocole BACI consiste à effectuer des mesures avant (Before) et après (After) l'installation de l'aménagement. Ces mesures sont récoltées sur des zones hors de portée de l'impact (Control) aussi bien que sur des zones susceptibles d'être impactées (Impact). Ce protocole possède l'avantage de ne tester que l'effet de l'impact, à l'exclusion de tout autre effet (Gotelli & Ellison, 2004).

Le principe du test est le suivant : dans la même analyse, on teste séparément l'effet de la Période en comparant le groupe Avant avec le groupe Après, l'effet du Traitement en comparant le groupe Contrôle avec le groupe Impact, et l'effet de leurs quatre interactions. Si seul l'effet des interactions est significatif, alors le test permet de conclure à un effet de l'impact, à l'exclusion de toute autre influence. Pourquoi, dans ces conditions, ne pas faire seulement la comparaison entre les groupes Contrôle et Impact ? Si seule cette comparaison avait été faite, il aurait été impossible d'éliminer une possible variabilité qui aurait pu être due aux différences entre éoliennes, et non à l'asservissement. La comparaison des groupes Avant et Après, permet de s'affranchir de l'influence de la période qui pourrait s'introduire dans l'effet et être la cause de la différence observée.

En se basant sur ce protocole, nous avons effectué deux analyses portant sur le test de l'effet de l'asservissement : la première analyse teste l'impact de l'asservissement sur la mortalité des chauves-souris et la deuxième teste l'impact de l'asservissement sur la mortalité en fonction des contacts acoustiques, pour tenir compte de la fréquentation des chauves-souris. Ces deux analyses ne portent que sur les données récoltées en 2009, dans la mesure où la régulation des éoliennes n'a été effective que cette année-là.

Test de l'effet de l'asservissement des éoliennes sur la mortalité des chauves-souris.

Le nombre de cadavres de chauves-souris a été comptabilisé au pied des 8 éoliennes du parc. Les cadavres ont été collectés chaque semaine du 17 juin au 20 octobre 2009. Parmi les huit éoliennes, 5 machines ont été soumises à des interruptions de fonctionnement du 16 mai au 9 septembre 2009. Les trois éoliennes restantes (machines 1, 2 et 3) dont le fonctionnement est resté non régulé constituent le groupe Contrôle du protocole BACI, tandis que trois des cinq machines dont le fonctionnement a été régulé (machines 4, 5 et 6) constituent le groupe Impact. Cette sélection a été opérée afin d'avoir le même nombre d'échantillons dans les deux groupes. Le choix des éoliennes a été effectué de manière à conserver le maximum de données, en écartant donc les machines 7 et 8 présentant le plus petit nombre de cadavres (Fig. 8). De même, étant donné la date d'arrêt d'activité des éoliennes et afin de préserver l'équilibre entre les différentes tailles d'échantillons, seules douze semaines de données ont été conservées dans les analyses, du 5 août au 20 octobre. Les deux périodes représentant les groupes Avant et Après sont donc constituées chacune de six semaines de comptage. Les quatre groupes Avant, Après, Contrôle et Impact sont composés de 36 échantillons.

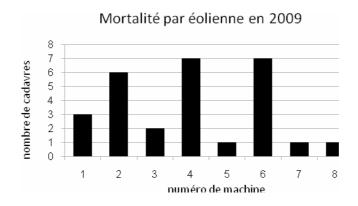


Figure 8 : nombre de cadavres de chauves-souris récoltés pour chaque éolienne en 2009. Les machines 1, 2 et 3 n'ont pas été régulées. Les machines 4, 5 et 6 ont été régulées du 16 mai au 9 septembre 2009. Les machines 7 et 8 ont été exclues des analyses.

Comme c'est souvent le cas dans les données de comptage, les données de mortalité ne sont pas distribuées normalement mais suivent une distribution de Poisson (Fig. 9). Le test statistique a donc été réalisé au moyen d'un modèle linéaire généralisé (GLM, ou Generalized Linear Model). Cette analyse est basée sur un modèle statistique qui permet de décrire de manière formelle quels sont les facteurs dont l'effet est testé. Nous avons adopté comme convention de décrire les interactions entre facteurs par le caractère ':'. Le modèle de l'analyse est le suivant :

Ln (nb de cadavres) = ordonnée à l'origine + Traitement + Période + Traitement : Période + erreurs

L'analyse a été faite deux fois : la première fois sans correction, et la deuxième fois en corrigeant le nombre de cadavres en fonction du taux de prédation et de l'efficacité de l'observateur. Dans ce deuxième cas, une variable « offset » a été rajoutée au modèle statistique pour prendre en compte la correction.

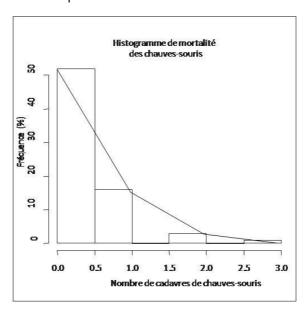


Figure 9 : Histogramme de mortalité des chauves-souris par semaine en 2009. Cette figure présente la fréquence en pourcentage de chaque nombre de cadavres rencontré dans l'ensemble de l'échantillon, et montre que la distribution des données suit approximativement une distribution de Poisson de paramètre $\lambda=0,6$

Test de l'effet de l'asservissement des éoliennes sur la mortalité des chauves-souris en fonction des contacts acoustiques

Pour cette nouvelle analyse, la précédente structure de test a été intégralement reprise. Les effets testés, les groupes et le nombre d'échantillons sont donc exactement les mêmes. Par ailleurs, les contacts acoustiques de chauves-souris ont été enregistrés pour chaque semaine du 01 janvier 2009 au 31 décembre 2009, mais seules les semaines correspondantes aux données de mortalité de l'analyse précédente ont été conservées. Afin d'obtenir des données de mortalité en fonction du contact acoustique, les données de nombre de cadavres par éolienne ont donc été divisées par le nombre de contacts enregistrés.

Comme précédemment, les données suivent une distribution de Poisson (Fig. 10) et des modèles linéaires généralisés ont été utilisés pour les deux analyses, avec et sans correction en fonction du taux de prédation et de l'efficacité de l'observateur. Le modèle statistique utilisé est :

Ln (nb de cadavres/ nb de contacts) = ordonnée à l'origine + Traitement + Période + Traitement : Période + erreurs

ou encore:

Ln (nb de cadavres) = ordonnée à l'origine + Traitement + Période + Traitement : Période + Ln (nb de contacts) + erreurs

Les propriétés mathématiques des logarithmes permettent d'enlever le nombre de contacts de la variable réponse (partie gauche des équations) pour le rajouter comme « offset » dans les variables explicatives (partie droite des équations) du modèle. Dans le cas de données suivant une distribution de Poisson ou une distribution binomiale négative, cette pratique est communément utilisée lorsque l'on doit tester des données exprimées sous forme de ratios et se rapporter à des données de comptage (par ex. Mac Cullagh & Nelder, 1989).

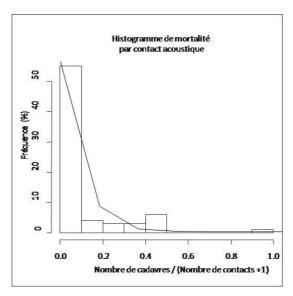


Figure 10 : Histogramme de mortalité en fonction du contact acoustique des chauves-souris par semaine en 2009. Cette figure présente, en pourcentage, la fréquence du nombre de cadavres pour chaque contact acoustique, et montre que la distribution des données suit approximativement une distribution de Poisson de paramètre λ = 0,3. Le 1 ajouté au nombre de contact permet de prendre en compte les zéros présents dans les données.

Comparaisons interannuelles

L'objectif des comparaisons interannuelles consiste à tester si l'année 2009 présente des différences significatives par rapport aux années précédentes. La comparaison concerne donc deux groupes, le premier composé des données de l'année 2009 et le second de la moyenne des années précédentes. Les scores d'activité étant disponibles depuis 2005, la moyenne regroupe les années 2005 à 2008. Pour effectuer ces comparaisons interannuelles, le protocole expérimental utilisé correspond au modèle d'ANOVA à un facteur, le facteur Année.

Comparaisons interannuelles des scores vent-températures

Dans un premier temps, les comparaisons interannuelles ont été effectuées sur les scores seuls. Les données de scores sont produites d'après le protocole présenté § 2.1.3.

Les analyses ont été conduites sur chaque mois de la période de fréquentation maximale observée des chauves-souris, c'est-à-dire de juin à octobre. Pour chaque mois, les deux groupes comparés - l'année 2009 et la moyenne 2005-2008 - étaient donc composés de 20 échantillons (4 semaines x 5 éoliennes). Cinq analyses ont été effectuées au total

pour cette partie, en utilisant la méthode de l'ANOVA à un facteur puisque les données de scores d'activité suivent une distribution normale et que la variance des résidus est homogène (Fig. 11). Le modèle statistique employé pour chaque test est le suivant :

score d'activité = ordonnée à l'origine + Année + erreurs

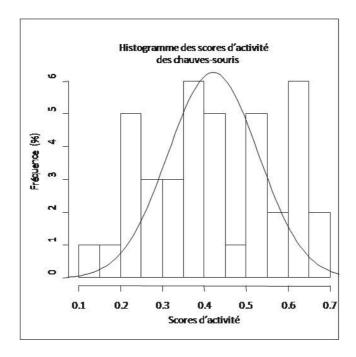


Figure 11: Histogramme des scores d'activité des chauves-souris par semaine de 2005 à 2009. Cette figure présente la fréquence en pourcentage de chaque activité théorique rencontrée dans l'ensemble de l'échantillon. Elle montre que la distribution des données suit approximativement une loi normale de moyenne μ = 0,42 et d'écart-type σ = 0,13.

Comparaisons interannuelles de la mortalité en fonction des scores d'activité

Lors de cette seconde analyse, les comparaisons interannuelles ont porté sur le rapport entre mortalité et scores d'activité. Les données de nombre de cadavres ont été moyennées sur les années pour le groupe 2005-2008, à l'exception de 2007 où elles n'étaient pas disponibles. Cette année a ainsi été exclue de la moyenne 2005-2008 composant le premier groupe. Pour les deux groupes, 2005-2008 et 2009, le nombre de cadavres a ensuite été divisé par le score d'activité correspondant.

Les données de mortalité étaient disponibles pour l'ensemble de la période de fréquentation maximale observée des chauves-souris et les données de scores d'activité ont été récoltées sur cinq éoliennes. L'unité d'échantillonnage a donc été sélectionnée comme étant le ratio mortalité/score par éolienne et par mois. Chaque groupe comprend alors 25 échantillons : 5 mois de la période de fréquentation maximale observée x 5 éoliennes.

La distribution de la variable réponse du modèle n'est pas normale, puisqu'elle comprend les données de mortalité. Des modèles linéaires généralisés ont été utilisés pour les deux analyses, avec et sans correction en fonction du taux de prédation et de l'efficacité de l'observateur, en prenant comme distribution de référence la distribution de Poisson. Cependant, un problème de surdispersion évident est apparu dans les résultats. Ce problème très fréquent apparaît lorsque le modèle ne capte pas toute la variabilité des

données, la déviance étant trop importante par rapport au nombre de degrés de liberté. Il y a alors un risque fort d'accepter un effet comme étant significatif bien qu'il ne le soit pas en réalité.

Pour pallier à ce problème, plusieurs solutions sont classiquement rencontrées dans la littérature (par ex. Zeileis *et al.*, 2010). Il est possible, entre autre, d'opter pour la distribution de quasi-poisson, d'opter pour la distribution binomiale négative ou d'ajouter un paramètre additionnel pour compenser la surdispersion. C'est la première solution qui a été employée dans la présente analyse.

Le modèle d'analyse est :

Ln (nb de cadavres) = ordonnée à l'origine + Année + Ln(score d'activité) + erreurs

Tous les tests statistiques ont été faits au moyen du logiciel R (R Development Core Team, 2010).

3 Résultats

3.1 Données des sites d'études

3.1.1 Données Landes de Couesmé

3.1.1.1 Activité en fonction de la vitesse du vent

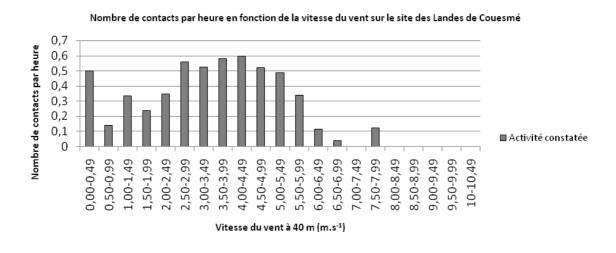


Figure 12 : représentation du nombre de contacts par heure en fonction de la vitesse du vent sur le site des Landes de Couesmé. 1008 contacts enregistrés du 9 août 2007 au 4 novembre 2007 sur un mât de 25 mètres de haut.

Les valeurs obtenues, exprimées en nombre de contact par heure (Fig. 12), permettent de comparer l'activité des chauves-souris en fonction de la vitesse du vent tout en s'affranchissant des différences d'échantillonnage réalisées pour chaque classe de vitesse de vent.

Le maximum d'activé des chauves-souris (0,6 contact par heure) est enregistré pour des vitesses de vent comprises entre 4 et 4,5 m.s⁻¹. Elle diminue ensuite irrégulièrement pour devenir nulle au-delà de 8 m.s⁻¹.

Nombre de contacts par heure en fonction de la température sur le site des Landes de Couesmé 10 Nombre de contacts par heure 8 6 4 2 ■ Activité constatée 0 34-35,9 26-27,9 2-3,9 4-5,9 8-9,9 20-21,9 22-23,9 24-25,9 28-29,9 30-31,9 12-13,9 14-15,9 8-19,9 16-17,9 32-33,9 Température (°C)

3.1.1.2 Activité en fonction de la température

Figure 13 : représentation du nombre de contacts par heure en fonction de la température sur le site des Landes de Couesmé. 1008 contacts enregistrés du 9 août 2007 au 4 novembre 2007 sur un mât de 25 mètres de haut

Classe de température maximale : 24-26°C

Classe de température minimale : 8-10°C

Le graphique (Fig. 13) permet d'observer que les chauves-souris exploitent une large plage de température, allant de 8 à 26° C. Le maximum d'activité est enregistré pour des températures de 20 à 22°C. L'activité des animaux n'est que peu affectée par la température entre 14 et 22 °C.

3.1.2 Donnes Tremblay

3.1.2.1 Activité en fonction de la vitesse du vent

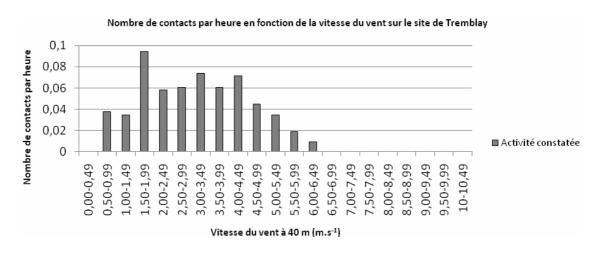


Figure 14 : représentation du nombre de contacts par heure en fonction de la vitesse du vent sur le site de Tremblay. 351 contacts enregistrés du 1 août 2008 au 31 juillet 2009 sur un mât de 40 mètres de haut.

Ce graphique (Fig. 14) indique que l'activité totale par heure en fonction de la vitesse du vent se répartit de manière irrégulière entre 0 et 4,5 m.s⁻¹. Au-delà de cette valeur l'activité diminue pour devenir nulle au-delà de 6,5 m.s⁻¹.

Aucune description de l'activité des chauves-souris n'a pu être faite sur Tremblay (données météorologiques manquantes).

3.1.3 Données des Hauts-Vaudois

3.1.3.1 Activité en fonction de la vitesse du vent

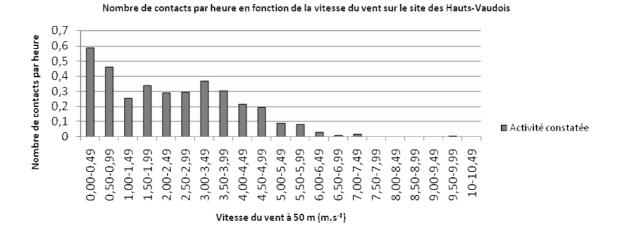


Figure 15 : représentation du nombre de contacts par heure en fonction de la vitesse du vent sur le site des Hauts-vaudois. 1067 contacts enregistrés du 27 juillet 2006 au 26 juillet 2007 sur un mât de 40 mètres de haut

Ce graphique (Fig. 15) indique que le maximum d'activé des chauves-souris (0,59 contact par heure) est enregistré pour des vitesses de vent inférieures à 0,5m.s⁻¹. Elle diminue ensuite pour atteindre un premier minimum entre 1 et 1,5 m.s⁻¹. Cette activité fluctue ensuite autour de 0,3 contacts par heure pour des vitesses de vent comprises entre 1,5 et 4 m.s⁻¹. Au-delà de cette vitesse de vent, l'activité décroit régulièrement pour devenir nulle au-delà de 10m.s⁻¹.

3.1.3.2 Activité en fonction de la température

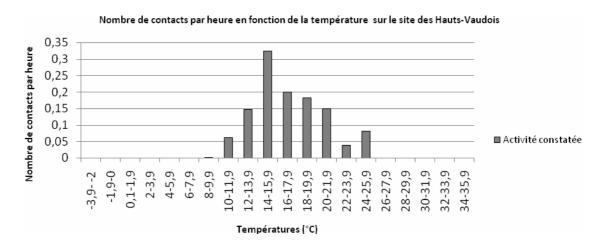


Figure 16 : représentation du nombre de contacts par heure en fonction de la température sur le site des Hauts-vaudois. 1067 contacts enregistrés du 27 juillet 2006 au 26 juillet 2007 sur un mât de 40 mètres de haut.

Classe de température maximale : 24-26°C

Classe de température minimale : 8-10°C

Le graphique (Fig. 16) permet d'observer que les chauves-souris exploitent une large plage de température, allant de 8 à 26° C. Le maximum d'activité est enregistré pour des températures de 14 à 16° C.

3.1.4 Synthèse de l'activité sur les trois sites

3.1.4.1 Activité en fonction de la vitesse du vent

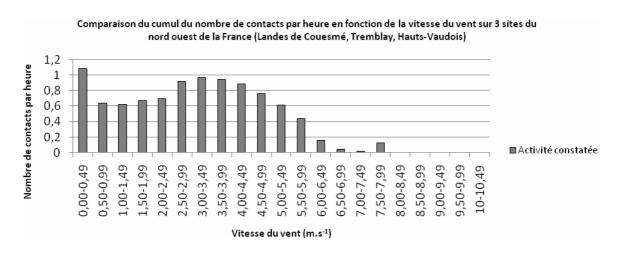


Figure 17 : représentation du nombre de contacts par heure en fonction de la vitesse du vent sur les sites des Landes de Couesmé , de Tremblay et des Hauts-Vaudois. 2426 contacts enregistrés.

Ce graphique (Fig. 17) indique que l'activité cumulée sur les trois sites présente un maximum d'activité (1,1 contacts.h⁻¹) pour des vitesses de vent comprises entre 0 et 0,5 m.s⁻¹, puis diminue pour rester stable entre 0,5 et 2,5 m.s⁻¹ à 0,6- 0,7 contacts.h⁻¹, avant de remonter à près d'un contact par heure pour des vitesses de vent comprises

entre 3 et 4,5 m.s⁻¹ . Au-delà de ce seuil, l'activité diminue régulièrement pour devenir nulle au-delà de 8 m.s⁻¹.

Cumul du nombre de contacts par heure en fonction de la température sur 2 sites du nord ouest de la France (Landes de Couesmé et Hauts-Vaudois) 2 Nombre de contacts par heure 1,5 1 0,5 ■ Activité constatée 0 22-23,9 26-27,9 28-29,9 30-31,9 8-9,9 14-15,9 2-3,9 10-11,9 18-19,9 20-21,9 24-25,9 34-35,9 12-13,9 Température (°C)

3.1.4.2 Activité en fonction de la température

Figure 18 : représentation du nombre de contacts par heure en fonction de la température sur les sites des Landes de Couesmé et des Hauts-Vaudois. 2426 contacts enregistrés.

Ce graphique (Fig. 18) indique que l'activité cumulée sur les deux sites présente un maximum d'activité (1,5 contacts.heure⁻¹) pour des températures comprises entre 14 et 22°C. Au-delà de ce seuil, l'activité diminue brusquement pour devenir nulle au-delà de 26 °C.

3.2 Modèles comportementaux

3.2.1 Paramètres climatiques

3.2.1.1 Vitesse du vent

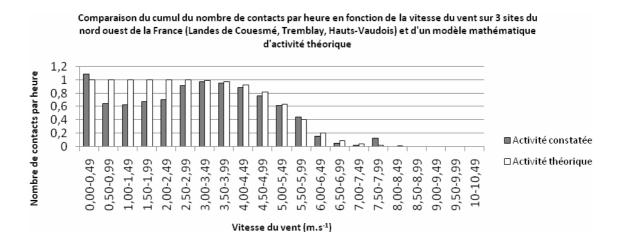


Figure 19 : superposition de l'activité cumulée enregistrée sur trois sites en fonction de la vitesse du vent et de la courbe d'activité théorique en fonction de la vitesse du vent, ajustée aux données (en % d'activité totale)

La sigmoïde (Fig. 18) modélise très bien la décroissance de l'activité entre 3 et 7,5 m.s⁻¹. L'adéquation théorie / observation est moins bonne en dessous de 2,5 m.s⁻¹ mais n'a pas été prise en compte car située en dessous de la vitesse de démarrage possible des éoliennes industrielles étudiées.

3.2.1.2 Température

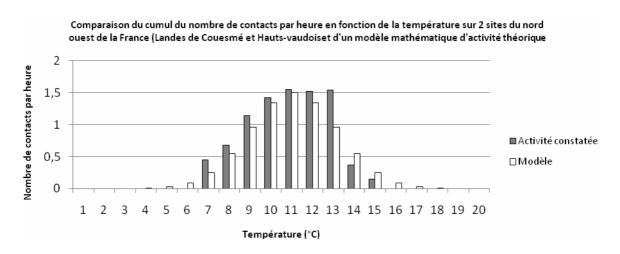


Figure 20 : superposition de l'activité cumulée enregistrée sur deux sites en fonction de la température et de la courbe d'activité théorique en fonction de la température, ajustée aux données (en % d'activité totale)

La courbe de Gauss (Fig. 19) modélise correctement les variations de l'activité en fonction de la température en sous-évaluant légèrement l'activité pour des températures faibles et en la sur-évaluant légèrement pour des températures élevées.

3.2.1.3 Score vent – température

Les évolutions de ces valeurs sont présentées sur le graphique suivant :

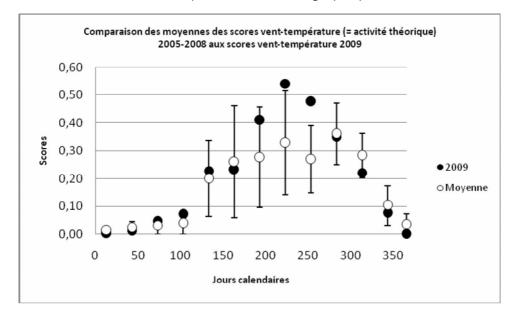


Figure 21 : comparaison de l'activité théorique moyenne sur la période 2005-2008 et de l'activité théorique sur l'année 2009.

Le graphique montre que les moyennes d'activité théorique (= score vent-température) par mois en 2009 sont très proches de celles des années précédentes pendant la majorité de l'année, sauf dans la période d'activité maximale des chauves-souris. Cette période d'activité maximale s'étend sur l'ensemble de la période estivale, de juillet à septembre (jours 200 à 250 sur le graphique).

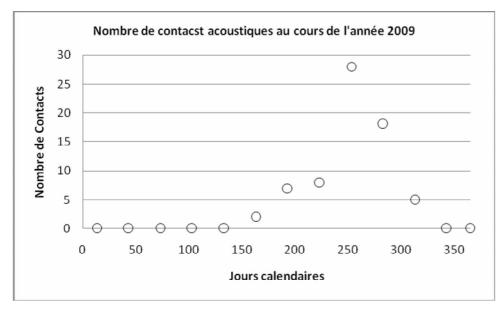


Figure 22 : activité enregistrée par Anabat au cours de l'année 2009 en fonction des jours calendaires

Les tests ANOVA réalisés sur les périodes estivales (tableau 2) montrent qu'au cours de l'année 2009, les mois de juillet, août et septembre ont été significativement plus favorables aux chauves-souris que les années précédentes. En revanche, aucune différence significative n'est détectée pour les mois d'octobre et novembre.

Tableau 2 : résultats des analyses de comparaison interannuelles des scores d'activité réalisées par ANOVA à 1 facteur. Le facteur testé ici est l'année, et plus précisément la différence entre l'année 2009 et les années précédentes. Les codes de significativité sont les suivants : NS non significatif, * significatif, * hautement significatif, * hautement significatif, * hautement significatif.

	Juillet	Août	Septemb re	Octobre	Novembr e
Degrés de libertés (facteur / résidus)	1 / 38	1 / 38	1 / 38	1 / 38	1 / 38
F-value	18,92	73.08	36.052	1.6577	0.1593
p-value	9.874e-05	2.205e-10	5.615e- 07	0.2057	0.692
significativité	***	***	***	NS	NS

3.2.2 Paramètres temporels

Pour réaliser l'asservissement des éoliennes, nous avons choisi d'utiliser un modèle prenant en compte la répartition différentielle de l'activité des chauves-souris au cours de la journée et au cours de l'année. Le détail de l'imbrication des paramètres climatiques et des cycles journaliers et annuels ne sera pas détaillé, néanmoins nous proposons une description rapide de ces paramètres individuels.

3.2.2.1 Heure

Nous avons considéré que l'activité des chauves souris pouvait commencer progressivement dès le coucher du soleil et s'arrêter progressivement pour devenir nulle au lever du soleil. L'activité peut s'infléchir en milieu de nuit, pendant une période de deux à quatre heures. La probabilité d'avoir des chauves-souris actives de jour est considérée comme nulle.

3.2.2.2 Date

De la même manière, nous avons considéré que l'activité des chauves-souris commençait progressivement fin avril pour s'arrêter progressivement fin octobre.

3.2.3 Asservissement

Le dispositif a été activé le 16 mai 2009 (jour 167) et désactivé le 09 septembre 2009 (jour 252).

La date de désactivation, au milieu de la période de migration des chauves-souris a permis de réaliser une période témoin interne à l'année 2009. Le récapitulatif des alertes envoyées et des arrêts effectifs est consigné dans le tableau suivant :

	Confirmation			
Heure début	Heure fin	Temps d'arrêt	de l'arrêt	
16/06/2009 22:27	16/06/2009 22:56	00:29	Oui	
02/07/2009 21:39	03/07/2009 05:06	07:27	?	
04/07/2009 20:32	05/07/2009 05:08	08:36	?	
05/07/2009 20:31	06/07/2009 05:08	08:37	?	
06/07/2009 22:55	07/07/2009 02:39	03:44	?	
25/07/2009 01:22	25/07/2009 01:58	00:36	?	
27/07/2009 22:41	28/07/2009 03:50	05:09	?	
28/07/2009 20:12	29/07/2009 00:25	04:13	?	
30/07/2009 03:09	30/07/2009 05:28	02:19	?	
30/07/2009 20:10	31/07/2009 02:55	06:45	Non	
31/07/2009 20:24	01/08/2009 05:36	09:12	Non	
01/08/2009 21:33	02/08/2009 01:11	03:38	Oui	
04/08/2009 18:54	04/08/2009 21:52	02:58	Oui	
05/08/2009 09:18	05/08/2009 09:34	00:16	Oui	
14/08/2009 21:59	15/08/2009 00:03	02:04	Oui	
14/08/2009 22:06	16/08/2009 00:47	02:41	Oui	
18/08/2009 21:54	19/08/2009 00:31	02:37	Oui	
19/08/2009 21:11	19/08/2009 23:14	02:03	Oui	
20/08/2009 03:53	20/08/2009 05:27	01:34	Oui	
20/08/2009 23:29	21/08/2009 00:29	01:00	Oui	
21/08/2009 03:11	21/08/2009 05:13	02:02	Oui	
21/08/2009 21:27	22/08/2009 00:02	02:35	Oui	
22/08/2009 21:26	23/08/2009 23:23	01:57	Oui	
23/08/2009 05:06	23/08/2009 05:15	00:09	Oui	
23/08/2009 22:23	24/08/2009 00:02	01:39	Oui	
24/08/2009 03:14	24/08/2009 03:57	00:43	Oui	
25/08/2009 03:15	25/08/2009 04:29	01:14	Oui	
25/08/2009 21:21	25/08/2009 23:57	02:36	Oui	
26/08/2009 03:16	26/08/2009 05:18	02:02	Oui	
26/08/2009 21:19	26/08/2009 23:36	02:17	Oui	
27/08/2009 03:17	27/08/2009 05:19	02:02	Oui	
28/08/2009 04:11	28/08/2009 04:48	00:37	Oui	
30/08/2009 03:30	30/08/2009 05:23	01:53	Oui	
03/09/2009 21:35	04/09/2009 00:01	02:26	Oui	
05/09/2009 03:38	05/09/2009 05:29	01:51	Oui	
05/09/2009 21:02	06/09/2009 00:02	03:00	Oui	
06/09/2009 22:01	07/09/2009 00:02	02:01	Oui	
07/09/2009 03:29	07/09/2009 05:32	02:03	Oui	
07/09/2009 20:57	08/09/2009 00:02	03:05	Oui	

3.3 Mortalité

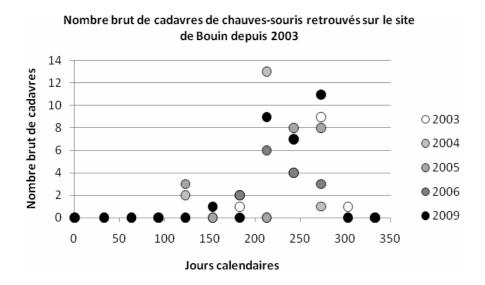
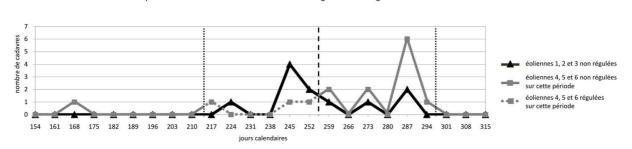


Figure 23 : Somme de la mortalité enregistrée par mois sur le site de Bouin au cours des années 2003-2006 et 2009.

3.3.1 Effet de la régulation du fonctionnement des machines sur la mortalité des chauves-souris

Le graphique présenté à la figure 24 illustre la comparaison de la mortalité en 2009 entre éoliennes régulées (groupe Impact dans les analyses) et non régulées (groupe Contrôle). Les lignes pointillées montrent les limites des deux périodes incluses dans l'analyse (groupes Avant et Après), qui sont séparées par la date d'arrêt de la régulation (ligne en tirets – jour 253). Il apparaît sur le graphique qu'au cours de la période Avant, la mortalité des éoliennes non régulées est supérieure à la mortalité provoquée par les éoliennes régulées, qui reste basse pendant les six semaines. Après l'arrêt de la régulation, la mortalité des éoliennes régulées augmente nettement, tandis qu'au cours de la même période, celle des éoliennes non régulées baisse.



Comparaison de la mortalité en 2009 entre éoliennes régulées et non régulées

Figure 24 : Comparaison de la mortalité en 2009 entre éoliennes régulées (carrés noirs) et non régulées (triangles gris). Les lignes pointillées correspondent aux limites des périodes qui sont intégrées dans l'analyse (début d'analyse, fin de régulation, fin d'analyse). Les deux périodes sont séparées par l'arrêt de la régulation, symbolisée par la ligne en tirets.

L'analyse présentée dans le tableau 3 montre que parmi les trois effets testés, seule l'interaction entre le traitement et la période (notée Traitement: Période) est significative.

Ces résultats démontrent l'effet de l'asservissement, sans effet masqué dû à la période ou au traitement, puisque les différences observées se situent :

- entre les éoliennes du groupe Impact avant et après l'arrêt de la régulation,
- entre les éoliennes du groupe Impact et celles du groupe Contrôle avant l'arrêt de la régulation.

Les seules différences observées sont donc bien liées uniquement à l'arrêt de la régulation. Elles indiquent donc clairement l'efficacité de l'asservissement.

Tableau 3 : résultats des analyses du test d'efficacité de l'asservissement sur la mortalité réalisée par GLM avec une distribution de Poisson. Les facteurs testés ici sont le traitement, la période, et leur interaction indiquée dans le tableau par un signe ' : '. Les codes de significativité sont les suivants : NS non significatif, * significatif, * hautement significatif, * très hautement significatif.

	Valeur estimée	Erreur standard	Z-value	p-value	significativité
Ordonnée à l'origine	-1,5041	0,5000	-3.008	0,0026	**
Traitement	1,0116	0,5839	1,7330	0,0832	NS
Période	0,5596	0,6268	0,8930	0,3719	NS
Traitement : Période	-1,8589	0,9039	-2,0560	0,0394	*

Les rapports entre déviance et degrés de liberté permettent de vérifier, aussi bien pour le modèle nul (déviance : 67,799, degrés de liberté : 71, ratio < 1) que pour la déviance résiduelle (déviance : 61,750, degrés de liberté : 68, ratio < 1) qu'il n'y a pas de surdispersion, puisque dans ce cas le ratio est largement supérieur, au moins égal à 2. Le choix du modèle est donc définitif.

La même analyse réalisée en tenant compte des facteurs de correction liés au taux de prédation et à l'efficacité de l'observateur aboutit aux mêmes résultats. Elle est présentée en Annexe.

3.3.2 Effet sur la mortalité en fonction de l'indice d'activité (nombre de contacts acoustique)

La figure 25 illustre la comparaison de la mortalité divisée par le nombre de contacts acoustiques entre éoliennes régulées et non régulées. En ce qui concerne la période après l'arrêt de la régulation, la tendance est aussi nette qu'au précédent paragraphe.

Comparaison de la mortalité par contact acoustique en 2009 entre éoliennes régulées et non régulées

2.5

2

1.5

0.5

0.5

0.5

154 161 168 175 182 189 196 203 210 217 224 231 238 245 252 259 266 273 280 287 294 301 308 315

Figure 25 : Comparaison de la mortalité par contact acoustique en 2009 entre éoliennes régulées (carrés noirs) et non régulées (triangles gris). Les lignes pointillées correspondent aux limites des périodes qui sont intégrées dans l'analyse. Les deux périodes sont séparées par l'arrêt de la régulation, symbolisée par la ligne en tirets.

L'analyse statistique (tableau 4) aboutit exactement aux mêmes conclusions que l'analyse précédente. Les différences liées à la pondération par l'indice d'activité (nombre de contacts acoustiques) n'influent que sur l'effet de la période, qui était déjà non significative dans la première analyse, et sur la valeur estimée de l'ordonnée à l'origine, qui ne constitue pas un objectif identifié dans cette étude. L'efficacité de l'asservissement est donc encore une nouvelle fois démontrée, cette fois-ci en tenant compte également de la présence des chauves-souris, quantifiée par détection acoustique.

Tableau 4 : résultats des analyses du test d'efficacité de l'asservissement sur la mortalité en fonction du contact acoustique réalisée par GLM avec une distribution de Poisson. Les facteurs testés ici sont le traitement, la période, et leur interaction indiquée dans le tableau par un signe ' : '. Les codes de significativité sont les suivants : NS non significatif, * significatif, * hautement significatif, * très hautement significatif.

	Valeur estimée	Erreur standard	Z-value	p-value	significativité
Ordonnée à l'origine	-3,0796	0,5000	-6,1590	7,31E-010	***
Traitement	1,0116	0,5839	1,7330	0,0832	NS
Période	0,3716	0,6268	0,5930	0,5533	NS
Traitement : Période	-1,8589	0,9039	-2,0560	0,0397	*

Les rapports entre déviance et degrés de liberté permettent de vérifier, aussi bien pour le modèle nul (déviance : 73,828, degrés de liberté : 71, ratio proche de 1) que pour la déviance résiduelle (déviance : 66,618, degrés de liberté : 68, ratio < 1) qu'il n'y a pas de surdispersion. Le choix du modèle est donc définitif.

La même analyse réalisée en tenant compte des facteurs de correction liés au taux de prédation et à l'efficacité de l'observateur aboutit aux mêmes résultats. Elle est présentée en Annexe.

3.3.3 Comparaisons interannuelles

3.3.3.1 Données brutes

La figure 22 présente la comparaison de la mortalité par groupe d'éoliennes entre 2009 et les années précédentes, à partir de 2003 puisque les données LPO de mortalité sont disponibles depuis cette année-là. Les groupes d'éoliennes correspondent aux groupes Contrôle et Impact utilisés dans les analyses, auxquels le groupe constitué de l'ensemble des éoliennes régulées a été ajouté (§. 2.1.5.2)

Cette comparaison montre une tendance très nette : sur le groupe Contrôle, il n'y a pas de différence de mortalité en 2009, tandis que la mortalité est bien supérieure en 2009 pour les deux autres groupes.

Il est nécessaire de souligner ici que ces chiffres prennent en compte l'ensemble de l'année 2009, c'est-à-dire avant, pendant et après la régulation. Par ailleurs, la différence entre le groupe comprenant l'ensemble des éoliennes régulées et le groupe Impact est très faible, et valide donc la sélection des éoliennes conservées dans le groupe Impact.

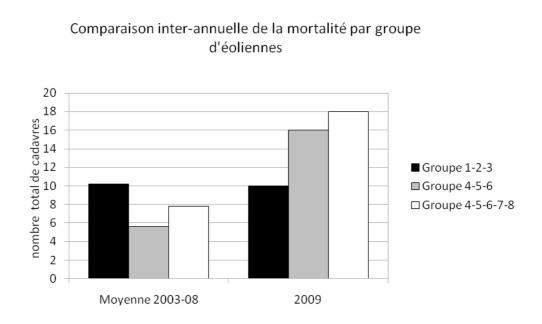


Figure 26 : Comparaison de la mortalité par groupe d'éoliennes entre 2009 et les années précédentes. Le groupe 1-2-3 illustré en noir correspond au groupe Contrôle des analyses, le groupe 4-5-6 en gris correspond au groupe Impact et le groupe 4-5-6-7-8 correspond à l'ensemble des éoliennes régulées.

3.3.3.2 Comparaison de la mortalité en fonction des scores d'activité

L'analyse menée avec le choix initial du modèle suivant une distribution de Poisson a montré des signes évidents de surdispersion, aussi bien pour le modèle nul (déviance : 233,23, degrés de liberté : 49, ratio > 4,5) que pour la déviance résiduelle (déviance : 220,43, degrés de liberté : 48, ratio > 4,5). L'analyse est donc réalisée avec une distribution de quasi-poisson.

Cette dernière analyse montre que le ratio mortalité / score d'activité est significativement différent pendant l'année 2009 par rapport à la moyenne des années précédentes (tableau 5).

Tableau 5 : résultats des analyses de comparaison inter-annuelles de la mortalité par score d'activité réalisée par GLM avec une distribution de quasi-poisson. Le facteur testé ici est l'année, et plus précisément la différence entre l'année 2009 et les années précédentes. Les codes de significativité sont les suivants : NS non significatif, * significatif, * * hautement significatif, * * très hautement significatif.

	Valeur estimée	Erreur standard	t-value	p-value	significativité
Ordonnée à l'origine	-0,29	0,35	-0.827	0.4123	NS
Année	1,07	0,49	2.151	0.0365	*

Le passage à la distribution de quasi-poisson s'est avéré efficace pour pallier à la surdispersion, puisque les ratios déviance / degrés de liberté sont inférieurs à un, tant pour le modèle nul (déviance : 41,641, degrés de liberté : 49) que pour la déviance résiduelle (déviance : 38,006, degrés de liberté : 48).

La même analyse réalisée en tenant compte des facteurs de correction liés au taux de prédation et à l'efficacité de l'observateur aboutit aux mêmes résultats. Elle est présentée en Annexe.

4 Discussion

4.1 Description de l'activité des chauves-souris sur les sites des landes de Couesmé, de Tremblay et des Hauts-Vaudois.

4.1.1 Activité en fonction de la vitesse du vent

La répartition de l'activité des chiroptères en fonction de la vitesse du vent est relativement homogène sur les trois sites présentés et permet la constitution d'un modèle où la vitesse du vent apparaît comme un facteur clef de régulation de l'activité des chauves-souris en altitude. L'activité des chiroptères en fonction de la vitesse du vent peut-être décrite par une sigmoïde présentant :

- Une phase de vent faible où les variations de vitesse de vent n'affectent que peu l'activité des chauves-souris en altitude,
- Une phase de vent moyen où les variations des vitesses de vent induisent une variation inversement proportionnelle de l'activité des chauves-souris en altitude,
- Une phase de vent fort où l'intensité de la vitesse du vent empêche l'activité des chauves-souris en altitude.

Plusieurs hypothèses permettent d'expliquer ces observations :

- Par des vents forts, l'effort nécessaire à ces animaux pour se déplacer devient trop important par rapport au gain d'énergie découlant de la capture d'insectes,
- La masse d'aéroplancton diminue avec des vitesses de vent élevées, rendant inutiles les comportements de chasse. Les chiroptères chasseraient alors à l'abri du relief ou de la végétation,

- Il n'est pas impossible que les performances du système d'écholocation soient affectées par des vents forts (déformation, bruits de fond...), ce qui rendrait la chasse moins efficace au cours de ces conditions.

4.1.2 Activité en fonction de la température

Comme pour l'analyse de l'activité des chiroptères en fonction de la vitesse de vent, l'analyse de l'activité de ces animaux en fonction de la température est comparable entre les deux sites étudiés (pas de données de température disponible sur le site de Tremblay) et permet la construction d'un modèle homogène. Les grands traits de l'influence de la température sur l'activité des animaux peuvent se résumer de la manière suivante :

- Deux phases, pour les températures très froides et très chaudes, où l'activité des chauves-souris est inhibée par la température,
- Une phase pour les températures basses à moyenne, ou les variations d'activité des chauves-souris sont proportionnelles à la hausse de température,
- Une courte phase pour les températures moyennes où l'activité des chauvessouris n'est pas affectée par la température,
- Une phase pour les températures chaudes où les variations d'activité des chauves-souris sont inversement proportionnelles aux variations de températures.

Plusieurs hypothèses permettent d'expliquer ces observations :

- Pour des températures faibles l'énergie thermique dissipée est trop importante pour que l'animal puisse maintenir sa température corporelle. Ces périodes correspondent également à des périodes où les déplacements d'insectes sont insuffisants pour assurer un bilan énergétique positif (alimentation / effort).
- Inversement pour des températures élevées, les animaux pourraient avoir du mal à évacuer la chaleur produite par l'effort de vol. Ces périodes pourraient également correspondre à des répartitions différentielles des animaux (plus haut, emportés par des courants ascendants où plus bas à la recherche de fraîcheur).

4.1.3 Modèles de comportement

4.1.3.1 Réalisation de modèles vent et température

Vitesse du vent

L'utilisation d'une sigmoïde permet de bien appréhender le comportement des animaux en fonction de la vitesse du vent, pour des vitesses de vent supérieures à 3 m.s-1. En dessous de cette valeur, la sigmoïde surévalue l'activité des chauves-souris, ce qui ne pose pas de problème pour notre application : les éoliennes sont toujours arrêtées pour ces vitesses de vent.

L'utilisation d'une sigmoïde permet d'adapter facilement le modèle aux particularités du site en jouant sur les variables Kv1 et Kv2 de la fonction décrite § 2.1.3.1.

Température

L'utilisation d'une courbe de Gauss permet de bien modéliser le comportement des animaux en fonction de la température, sur toute la plage de température rencontrée. La chute d'activité pour les températures supérieures à 20° est surprenante, mais ce répète sur les deux sites ayant permis la collecte des données utilisées dans le modèle d'asservissement du parc de Bouin.

L'utilisation d'une courbe de Gauss permet d'adapter facilement le modèle aux particularités du site en jouant sur les variables K°1 et K°2 de la fonction décrite § 2.1.3.2.

4.1.3.2 Réalisation d'un modèle vent-température facilement paramétrable

En première approche, le modèle vent température est obtenu en multipliant des scores de vent et les scores de température, sans pondérer les scores. L'activité théorique obtenue modélise de manière satisfaisante le comportement des chauves-souris déterminé par les indices d'activité acoustiques. Par contre il ne permet pas de modéliser les passages migratoires ayant provoqué une sur-mortalité constatée entre septembre et octobre 2009 (Fig. 20 & 21).

En dehors de cette lacune qui nécessite la superposition d'un modèle « risque migratoire » les algorithmes utilisés modélisent de manière satisfaisante le comportement des animaux tout en pouvant être facilement adaptés aux spécificités d'un site en modifiant seulement 4 constantes : Kv1, Kv2, K°1 et K°2, défines dans le § 2.1.3.

4.2 Système de pilotage des éoliennes

Le programme de recherche Chirotech a permis la réalisation d'un système d'asservissement multifactoriel d'un parc éolien, constituant à notre connaissance une première mondiale. L'approche que nous avons développée est plus complexe que celle réalisée sur les études précédentes (Arnett & Schirmacher, 2009 ; Baerwald *et al.* 2009) n'utilisant que la vitesse de vent (voir l'heure) comme facteur de régulation des éoliennes.

Ce type de modèle présente plusieurs avantages majeurs par rapport à ce qui a été publié :

- La prise en compte de plusieurs paramètres clefs permet de préciser les prédictions du modèle et d'augmenter les périodes de fonctionnement des machines : les pertes de production enregistrées sur Bouin sont 3 fois inférieures à celles publiées par Arnett et Schirmacher en 2009, pour des variations de mortalité similaires ($\Delta = 5$ %),
- Le coût de mise en place et de gestion est beaucoup plus léger que le paramétrage manuel des machines et de ces adaptations progressives au cours du temps. Chirotech permet en effet de modéliser l'activité sur une année entière sans avoir à planifier d'interventions humaines,

- Il est possible de prévoir une adaptation du système sur des anciennes machines en utilisant une seule entrée analogique ou digitale sur les automates de gestion des éoliennes,
- Le dispositif s'est montré opérationnel dès la première session d'essai. Il nécessite une fiabilisation (en cours de finalisation) pour être commercialisé.

4.3 Test du système de pilotage sur le parc de Bouin

4.3.1 Comparaison inter-machine et inter-période

4.3.1.1 Résultats de la mortalité

La comparaison des variations de mortalité entre les machines témoins et les machines régulées, sur la période de régulation montre une baisse de mortalité de 57% sur les machines régulées.

La comparaison de la mortalité sur les machines régulées et sur les mêmes machines après arrêt de la régulation montre une baisse de mortalité de 72 % sur les machines régulées.

Dans les deux cas ces différences sont statistiquement significatives. La régulation du fonctionnement des éoliennes a induit une baisse significative de la mortalité des chiroptères.

4.3.1.2 Résultats de la mortalité constatée par indice d'activité

De la même manière, la comparaison de la mortalité par indice d'activité sur les machines régulées et sur les mêmes machines après arrêt de la régulation montre une baisse de mortalité de 74 % sur les machines régulées

Cette différence est statistiquement significative. A nouveau, la régulation du fonctionnement des éoliennes a induit une baisse significative de la mortalité des chiroptères.

4.3.2 Comparaisons interannuelles

L'analyse brute des variations de mortalité interannuelles indique une hausse significative de la mortalité sur 2009. Cependant cette hausse est difficilement interprétable :

Elle ne peut être due à la régulation puisque les tests de régulation inter-machines et inter-périodes montrent clairement que l'arrêt des machines induit une baisse de mortalité. Les variations de mortalité d'une année sur l'autre peuvent résulter de plusieurs paramètres affectant :

- l'activité des chauves-souris sur le site
- les taux de disparition et de découverte des cadavres

4.3.2.1 Variations climatiques

Activité théorique (scores vent-température)

Nous avons montré que les scores vent-température ont été statistiquement supérieurs en 2009 par rapport à la moyenne 2005-2008. A lui seul ce point peut expliquer une hausse significative de l'activité des chauves-souris. Cependant les tests statistiques réalisés sur les comparaisons de mortalité corrigée par l'activité théorique donnée par les scores vent-température ne permettent pas d'expliquer la totalité des variations.

Parmi les autres paramètres ayant pu influencer l'activité des chauves-souris, nous pouvons envisager :

- La direction du vent,
- Les variations climatiques sur des sites distants, écologiquement connectés au site de Bouin,
- Les variations de densité de populations de chauves-souris,
- Les variations de pollution lumineuse sur le site.

Ces points sont détaillés dans les paragraphes suivants.

Direction du vent

Compte-tenu de l'implantation du parc éolien de Bouin, l'orientation du vent, et donc l'orientation des rotors peut considérablement modifier la surface brassée par les pâles coupant la route de chauves-souris en transit (migrations) (fig. 4), à priori suivant un axe nord-sud. L'analyse des variations d'orientation du vent aux cours de la période 2003-2009 montre que ce paramètre varie de manière importante en fonction des années (pour un même mois). Cependant la corrélation mortalité / orientation du vent n'est pas évidente en première approche, la mortalité semble même être supérieure lorsque les vents sont orientés est-ouest.

Variations climatiques sur des sites distants ou sur des périodes antérieures

Les seules variations des paramètres climatiques enregistrées sur le site ne peuvent pas expliquer toutes les variations d'activités :

Des phénomènes s'établissant sur des pas de temps plus longs peuvent affecter les ressources trophiques, les densités de populations de prédateurs et de parasites, modifiant ainsi la densité ou l'activité des populations sur le site d'étude. Ces paramètres sont difficiles à appréhender mais peuvent partiellement être débiaisés en mesurant l'activité des animaux sur le site (comptages de gîtes, écoutes ultrasonores...) comme ce qui a été fait en comparant la mortalité à l'activité constatée (§ 3.4.1.1, seconde partie).

4.3.2.2 Densité des populations de chauves-souris

Les suivis de population de chauves-souris réalisés par le MNHN montrent localement la hausse récente des populations de certaines espèces. Qu'en est-il sur Bouin ? Il est possible que les populations de chauves-souris suivent une tendance similaire sur ce site. Ce point est à vérifier, mais il pourrait considérablement complexifier les comparaisons interannuelles de mortalité constatée au pied des éoliennes. Si cette tendance est vérifiée, elle pourrait induire une hausse significative de la mortalité sur les prochaines années.

4.3.2.3 Pollution lumineuse

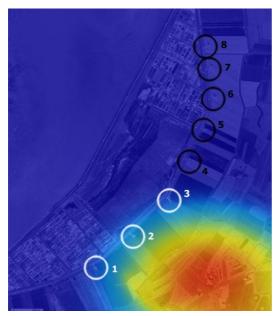


Figure 27 : superposition de la carte de pollution lumineuse locale et du plan d'implantation des machines sur le parc éolien de Bouin (d'après AVEX – Carte de pollution lumineuse visuelle).

La superposition de la carte de pollution lumineuse et le plan de masse du site, montre que les trois éoliennes sud (1,2 et 3) sont éclairées (Fig. 27). Cet éclairement peut expliquer de manière indirecte (attraction d'insectes) la surmortalité observée sur ces machines. De possibles variations d'éclairement entre les années, pourrait induire des variations de mortalité. La réalisation d'un plan de gestion de l'éclairage à proximité du site pourrait être proposée comme mesure réductrice.

4.3.2.4 Autres facteurs

La combinaison de l'ensemble de ces paramètres, sans que la liste présentée soit exhaustive, induit certainement une grande partie des variations d'activité pouvant être observées sur le site. L'influence de la vitesse du vent et de la température a d'ores et déjà pu être modélisée, l'orientation du vent est accessible mais les autres paramètres peuvent être beaucoup plus complexes et il est probable qu'ils n'agissent pas seuls. Il faut également veiller à trouver un équilibre entre effort de modélisation et performance du modèle.

4.4 Limites de l'étude

4.4.1 Limites de la détermination des indices d'activité

4.4.1.1 Etalonnage des Anabats

L'étalonnage des Anabats utilisés pour déterminer l'activité des chauves-souris n'est possible, hors laboratoire spécialisé, que depuis le début de l'année 2009. Les résultats présentés sont obtenus avec du matériel non étalonné. Cette absence d'étalonnage ne permet pas de comparaisons quantitatives inter-Anabat, et donc inter-sites dans la mesure où les suivis sont réalisés avec des Anabats différents sur chaque site dans le cas de cette étude.

4.4.1.2 Utilisation d'un microphone déporté

Le spectre de sensibilité initiale du système Anabat (20 – 200 kHz) peut-être modifié par l'ajout d'un câble entre le microphone et l'Anabat, utilisé pour déporter le microphone. Les enregistrements obtenus laissent supposer que le dispositif fonctionne correctement pour des plages de fréquence allant de 20 à 50-55 kHz. L'absence de contacts enregistrés au-delà de cette fréquence haute peu correspondre soit :

- A une absence effective d'animaux émettant à ces fréquences en altitude (hautes fréquences utilisées pour analyser de petits objets à faible distance car les hautes fréquences présentent des longueurs d'onde courtes et une forte atténuation atmosphérique)
- A une atténuation importante du signal dans le câble le rendant non détectable par le système de « trigger » de l'Anabat.

Dans la mesure où la détermination des modèles ce fait constamment avec les mêmes biais, elle ne doit pas affecter notre appréciation des variations d'activité au cours des variations de conditions météorologiques et encore moins présenter une dérive au cours des cycles journaliers et annuels. Elle peut néanmoins aboutir à une sous-évaluation de l'activité de certaines espèces.

4.4.1.3 Passage de chauves-souris n'émettant pas d'ultra-sons

Le système utilisé ne permet pas de détecter d'éventuels animaux silencieux n'émettant pas d'ultra-sons. Un tel phénomène pourrait avoir lieu notamment lors des transits en altitude et des déplacements migratoires. Cela reste une supposition et n'a jamais été documentée dans des publications scientifiques. La présence de tels phénomènes pourrait être validée ou invalidée par le dispositif DECAN (§ 4.5.4.).

4.4.1.4 Positionnement du système sur un mât de mesure

Le système de détection par ultrason mobilisé sur les études conventionnelles préalables à l'asservissement des éoliennes présente une portée limitée, enregistrant uniquement l'activité des chauves-souris dans la zone où il est installé. Cette activité ne reflète donc pas de possibles variations aux abords des haies ou des différentes formations paysagères existantes, mais uniquement l'activité autour du point de mesure (Fig. 5).

4.4.2 Limites du modèle et de son extrapolation à Bouin

Le modèle réalisé à partir de la synthèse des informations provenant des sites des Landes de Couesmé, de Tremblay et des Hauts-Vaudois semble homogène et représentatif de l'activité moyenne des chiroptères sur ces sites. Son extrapolation au site de Bouin présente néanmoins des problèmes liés aux différences d'habitats et aux passages possibles d'animaux en migration.

En effet, la comparaison de l'activité théorique obtenue avec le modèle comportemental et de l'activité effective enregistrée sur le site, fait apparaître une sous-estimation de l'activité réelle sur la fin de l'année. Dans la mesure où cette activité est essentiellement imputable à de la Pipistrelle de Nathusius, il est probable que le site de Bouin soit parcouru par des passages migratoires non enregistrés sur les trois autres sites, donc non modélisés (ou passage d'animaux silencieux).

L'analyse rapide de la composition des cortèges spécifiques trouvés sur le site laisse supposer que :

- cette migration n'est pas régulière et peut présenter des variations notables d'une année sur l'autre, soit quant à la localisation de l'axe de déplacement, soit quant à quantité d'animaux en déplacement,
- Les animaux migrants sont différemment impactés par les machines en fonction des conditions météorologiques.

Les variations observées peuvent, bien sûr, résulter de la combinaison de ces différents facteurs.

4.4.3 Limites du suivi de mortalité

4.4.3.1 Variations des coefficients de disparition

Les facteurs de correction des résultats varient d'un facteur supérieur à deux entre les saisons d'une même année et présentent des variations interannuelles équivalentes. A elles seules, ces variations peuvent masquer des phénomènes liés à des variations effectives de fréquentation du site ou des baisses effective de mortalité induite par l'asservissement des machines.

4.4.3.2 Facteurs humains

La méthodologie utilisée repose sur les performances d'un unique opérateur, ce qui permet d'éliminer des biais inter-utilisateurs mais ne permet pas de s'affranchir de phénomène de fatigue de lassitude ou au contraire d'optimisation des performances. Le test bisannuel de performances de l'utilisateur est insuffisant pour garantir la stabilité des résultats.

4.4.3.3 Nombre de cadavres

En dépit d'un échantillonnage adéquat, le nombre effectif de cadavres retrouvés est très faible : moins d'un cadavre par mois et par machine. Ce manque de données complique la réalisation de traitements statistiques avant application des facteurs de correction censés ramener la mortalité constatée à la mortalité réelle. Par ailleurs, l'application des facteurs de correction n'est possible que si au moins un cadavre est retrouvé : elle ne peut s'appliquer sur des valeurs nulles, alors qu'avec ce type de données, beaucoup de valeurs nulles sont présentes dans l'échantillon. Une limitation des biais de récolte, ainsi que l'utilisation de paramètres de corrections statistiques, constituent des axes sur lesquels orienter l'effort afin d'améliorer sensiblement les conclusions d'une telle étude.

Malgré le très faible nombre de cadavres retrouvés, l'emploi de méthodes statistiques puissantes (ANOVA, GLM) a permis de démontrer sans ambiguïté l'efficacité de l'asservissement et les différences interannuelles. Les mêmes analyses réalisées avec des tests non-paramétriques n'auraient probablement pas abouti aux mêmes résultats pour une simple question de puissance. Cependant, ce faible nombre de cadavres amène à émettre des réserves sur deux points : premièrement, si les tests des effets sont clairement concluants, leur portée ne peut être étendue au-delà de l'échelle locale, c'est-à-dire principalement au-delà de l'année 2009, ainsi qu'à d'autres parcs éoliens ; deuxièmement, la précision des estimations des paramètres ne peut être satisfaisante dans ces conditions, et cette réserve concerne particulièrement l'estimation de l'augmentation de la mortalité quand la régulation des éoliennes a été arrêtée.

Néanmoins, avec les mêmes limites méthodologiques et des nombres de cadavres comparables, les publications d'Arnett & Schirmacher et de Baerwald *et al.* décrivent des

baisses de mortalité de 50 à 90 %. De manière comparable et avec les mêmes limites, nous pouvons affirmer que le dispositif Chirotech a induit une baisse de mortalité de 57 à 74 %.

5 Conclusion et perspectives

5.1 Collecte des informations

Le système de détermination des indices d'activité en fonction des variations de condition météorologique permet de collecter des jeux de données cohérents avec les observations empiriques des chiroptérologues, malgré les limites connues de ce système (§ 4.4.1). Certaines de ces limites pourront être levées rapidement (étalonnage du dispositif pour comparaison inter-sites). D'autres resteront certainement sous-jacentes lors des prochaines études (atténuation des hautes fréquences...) à moins que des possibilités de corrections apparaissent où que ces biais s'avèrent excessivement gênants pour la poursuite des études, ce qui déclencherait des recherches complémentaires.

Par ailleurs, cette méthode est en cours de consolidation sur un site pilote ou les études acoustiques sont complétées par un suivi automatisé par radar.

5.2 Réalisation des modèles comportementaux

Les modèles comportementaux réalisés dans le cadre de cette étude ont permis de répondre en partie aux besoins de modélisation du comportement des animaux. Les variations d'activité liées aux conditions météorologiques semblent bien prises en compte par le modèle. Par contre, la sur-activité observée en période migratoire n'est pas modélisée de manière probante. Les phénomènes migratoires devront être modélisé pour être intégré à un modèle global ou constituer un modèle indépendant qui se superposera à l'activité « météorologique ».

5.3 Réalisation du système d'asservissement

Le programme Chirotech a permis la réalisation d'un système d'asservissement opérationnel adaptable sur des machines anciennes (2003 pour Bouin) totalement intégrable au SCADA NC2 de NORDEX. Techniquement, il est envisageable d'adapter ce système à n'importe quel autre type d'éolienne pilotée par SCADA ou par un système local utilisant soit des entrées numériques soit des entrées analogiques. Les options techniques actuelles évolueront au cours de l'année 2010 pour fiabiliser le système.

5.4 Validation de l'efficacité du dispositif

L'efficacité du système a été validée sur les tests inter-machines (machines asservies et non-asservies) et inter-périodes (asservissement et arrêt de l'asservissement). Chirotech constitue d'ores et déjà un système capable de réduire la mortalité des chauves-souris d'un facteur allant de 57 à 74 % pour des pertes de production électriques inférieures à 0,1 %.

Les comparaisons interannuelles de mortalité ne peuvent être réalisées sur un site présentant autant de variations naturelles interannuelles.

5.5 Consolidation de la validation - répétition des essais

5.5.1 Sur le parc de Bouin

Le plan d'échantillonnage de cette étude a été réalisé en fonction de plusieurs éléments, notamment :

- L'historique du site,
- Les partenaires,
- Les financeurs,
- Les sous-traitants,
- Les éléments techniques.

Si cette expérience doit être répétée, il serait préférable de construire un plan d'échantillonnage uniquement conçu de manière à faciliter et à consolider les analyses statistiques, sans prendre en compte d'autres intérêts.

D'autre part, pour consolider les données et faciliter leur analyse, il est impératif de réaliser un suivi de mortalité plus régulier ou mobilisant d'autres techniques (§ 5.5.4).

5.5.2 Sur d'autres sites

L'analyse des données sur Bouin est compliquée par :

- Le plan d'échantillonnage,
- Le manque de cadavres.

Il est souhaitable de pouvoir répliquer cette expérience sur des sites induisant des mortalités plus importantes, et en appliquant un plan d'échantillonnage tel qu'il pourrait être défini suivant les indications du paragraphe 5.5.1.

5.5.3 Amélioration du protocole de suivi

Le protocole utilisé pour évaluer la mortalité induite par les éoliennes est issu de publications anciennes (Winkelman 1989, 1992), essentiellement dédiée à l'étude de la mortalité d'oiseaux.

Depuis de nouveaux travaux (Arnett & Schirmacher 2009 ; Baerwald *et al.*2009) ont permis la mise en place de protocoles plus complets, plus efficaces, mais également plus lourds à mettre en œuvre. Ils pourraient inspirer nos futurs suivis de mortalité, en cherchant à trouver un équilibre entre l'efficacité des protocoles et leur facilité de mise en œuvre.

5.5.4 Développement de nouveaux outils

L'amélioration des protocoles de suivi de mortalité pourrait passer par une modification drastique de la nature des suivis de mortalité : au lieu de continuer à tenter de retrouver les animaux morts au sol et de corriger le nombre de cadavre par des facteurs de correction reflétant l'efficacité de l'opérateur ou la pression de prédation, il est envisageable de réaliser des systèmes automatiques de comptage des interactions animaux - pales d'éoliennes.

Au moins deux pistes de travail sont envisageables :

5.5.4.1 WT-Bird

Détecter les collisions sur les pales : cette solution, baptisée « WT-Bird » a été explorée depuis 2002 par l'équipe de l'Energy research Centre of The Netherlands. Il est basé sur le couplage d'un système acoustique détectant les collisions sur les pales des éoliennes, déclenchant une capture vidéo en cas de collision (Fig.20) (Wiggelinkhuizen et al. 2004).

Après trois années de tests, l'ECN a abandonné le projet qui manquait de fiabilité (Fairley, 2007) pour le remplacer par le système TADS, en cours de développement entre les années 2002 et 2006, sans succès. Elle est aujourd'hui reprise par un bureau d'étude (Calydris). Cette méthode pourrait donner des résultats satisfaisants pour les comptages de chocs oiseau-éoliennes mais sera totalement inadaptée au comptage de la mortalité induite sur les chauves-souris dans la mesure où une partie variable de la mortalité est due à des barotraumatismes (pas de contacts chauves-souris / éolienne), n'impliquant pas de chocs, donc pas de vibrations.

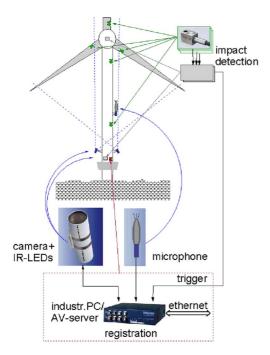


Figure 28 : schéma de principe du système WT-bird

5.5.4.2 DECAN

DECAN (**Dé**tection de **C**ollision d'**An**imaux) est un projet porté par la société Biotope. Il est destiné à suivre l'activité de l'ensemble des animaux (oiseaux, chauves-souris, insectes centimétriques) dans le volume brassé par les pales des éoliennes. Ce système permet de décrire finement le comportement des animaux à proximité immédiate des pales et de comptabiliser, s'il y a lieu, les occurrences de mortalité.

En cas de détection de collision, il gère un système d'alerte permettant de prendre une photo haute définition de l'animal et de prévenir des opérateurs pour rechercher le cadavre.

Couplé à un système de collecte des données météo, il permet de modéliser le comportement des animaux en fonction des cycles journaliers, saisonniers et des conditions météo, comme ce qui a été fait au cours du programme Chirotech (§ 2.5).

DECAN mobilise un système de collecte et d'analyse d'image exclusif permettant de combiner :

- un stockage de la totalité des informations collectées sur des périodes pouvant dépasser un an
- et une analyse en temps réel des accidents.

Son utilisation permet de coupler l'analyse du comportement des oiseaux et des chauvessouris sans doubler les installations (optiques pour les oiseaux - ultrasonore pour les chauves-souris).

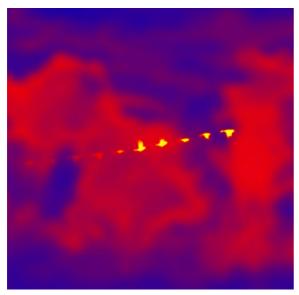


Figure 29 : informations collectées par Décan (modélisation de résultats - échantillon en fausses couleurs) (H. Lagrange BIOTOPE, 2009)

6 Bibliographie

Bibliographie

Arnett, E.B. & Schirmacher, M., **2009**. Annual Report Prepared for the Bats and Wind Energy Cooperative and the Pennsylvania Game Conservation.

Baerwald, E.F., Edworthy, J., Holder, M., Barclay, R.M.R., **2009**. *A Large-Scale Mitigation Experiment to Reduce Bat Fatalities at Wind Energy Facilities*. Journal of Wild Life Management 73(7)/1077-1081.

DÜRR, T., **2003**. Windenergieanlagen und Fledermausschutz in Brandenburg - Erfahrungen aus Brandenburg mit Einblick in die bundesweite Fundkartei von

Windkraftopfern. Kommen die Vögel und Fledermäuse unter die Windräder, Dresden, 17.-18.11.2003.

Fairley, P., 2007. *Massive Offshore Wind Turbines Safe for Birds*, Technology Review. Massachusetts Institute of Technology

Gotelli, N.J. & Ellison, A.M., **2004**. *A primer of ecological statistics*, Sinauer Associates, Sunderland.

McCullagh, P. & Nelder, J.A., **1989**. *Generalised Linear Models*, 2nd Edition, Chapman et Hall, London.

R Development Core Team, **2010**. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-00-3, URL http://www.R-project.org/

Zeileis, A., Kleiber, C. & Jackman, S., **2010**. *Regression model for count data in R*. R package pscl version 1.03.3 URL: http://cran.r-project.org/web/packages/pscl/index.html

Winkelman, J.E., **1989**. Vogels *en het windpark nabij Urk (NOP): aanvaringsslachtoffers en verstoring van pleisterende eenden ganzen en zwanen*. RIN-rapp. 89/15. RIN, Arnhem.

Winkleman, J.E., **1992**. The impact of the Sep wind park near Oosterbierum, Friesland, The Netherlands, on birds. 1. Collision victims. Rijksinstituut voor Natuurbeheer, Arnhem. RIN-Rapport 92/3.

Annexe : Analyses réalisées en tenant compte des facteurs de correction liés au taux de prédation et à l'efficacité de l'observateur.

Résultats de l'analyse du test d'efficacité de l'asservissement sur la mortalité des chauves-souris

Analyse réalisée par GLM avec une distribution de Poisson. Les facteurs testés ici sont le traitement, la période, et leur interaction indiquée dans le tableau par un signe ' : '. Les codes de significativité sont les suivants : NS non significatif, ** significatif, ** hautement significatif, ** hautement significatif.

	Valeur estimée	Erreur standard	Z-value	p-value	significativité
Ordonnée à l'origine	0,1844	0,5000	0,369	0,7123	NS
Traitement	1,0116	0,5839	1,7330	0,0832	NS
Période	0,5596	0,6268	0,8930	0,3719	NS
Traitement : Période	-1,8589	0,9039	-2,0560	0,0397	*

Les rapports entre déviance et degrés de liberté permettent de vérifier, aussi bien pour le modèle nul (déviance : 67,799, degrés de liberté : 71, ratio ratio < 1) que pour la déviance résiduelle (déviance : 61,750, degrés de liberté : 68, ratio < 1) qu'il n'y a pas de surdispersion. Le choix du modèle est donc définitif.

Résultats de l'analyse du test d'efficacité de l'asservissement sur la mortalité des chauves-souris en fonction du contact acoustique

Analyse réalisée par GLM avec une distribution de Poisson. Les facteurs testés ici sont le traitement, la période, et leur interaction indiquée dans le tableau par un signe ' : '. Les codes de significativité sont les suivants : NS non significatif, ** significatif, ** hautement significatif, ** hautement significatif.

	Valeur estimée	Erreur standard	Z-value	p-value	significativité
Ordonnée à l'origine	-1,3911	0,5000	-2,782	0,0054	**
Traitement	1,0116	0,5839	1,7330	0,0832	NS
Période	0,3716	0,6268	0,5930	0,5533	NS
Traitement : Période	-1,8589	0,9039	-2,0560	0,0397	*

Les rapports entre déviance et degrés de liberté permettent de vérifier, aussi bien pour le modèle nul (déviance : 73,828, degrés de liberté : 71, ratio proche de 1) que pour la déviance résiduelle (déviance : 66,618, degrés de liberté : 68, ratio < 1) qu'il n'y a pas de surdispersion. Le choix du modèle est donc définitif.

Résultats de l'analyse de comparaison interannuelle de la mortalité par score d'activité

Analyse réalisée par GLM avec une distribution de quasi-poisson. Le facteur testé ici est l'année, et plus précisément la différence entre l'année 2009 et les années précédentes. Les codes de significativité sont les suivants : NS non significatif, * significatif, * hautement significatif, * hautement significatif.

	Valeur estimée	Erreur standard	t-value	p-value	significativité
Ordonnée à l'origine	1,40	0,35	3,984	0.0002	***
Année	1,07	0,49	2.151	0.0365	*

Le passage à la distribution de quasi-poisson s'est avéré efficace pour pallier à la surdispersion, puisque les ratios déviance / degrés de liberté sont inférieurs à un, tant pour le modèle nul (déviance : 41,641, degrés de liberté : 49) que pour la déviance résiduelle (déviance : 38,006, degrés de liberté : 48).