

**Direction des bibliothèques**

**AVIS**

Ce document a été numérisé par la Division de la gestion des documents et des archives de l'Université de Montréal.

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

**NOTICE**

This document was digitized by the Records Management & Archives Division of Université de Montréal.

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Université de Montréal

**Impact du virus du Nil occidental sur les caractéristiques de la  
population de corneilles au Québec**

par

Antoinette Ludwig

Département de pathologie et microbiologie

Faculté de médecine vétérinaire

Thèse présentée à la Faculté des études supérieures et postdoctorales

en vue de l'obtention du grade

Philosophiae Doctor (Ph.D.)

en sciences vétérinaires

option épidémiologie

Décembre, 2008

© Antoinette Ludwig, 2008



Université de Montréal  
Faculté des études supérieures et postdoctorales

Cette thèse intitulée

**Impact du virus du Nil occidental sur les caractéristiques de la  
population de corneilles au Québec**

présentée par  
Antoinette Ludwig

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes

Jean-Pierre Vaillancourt, président-rapporteur  
Michel Bigras-Poulin, directeur de recherche  
Denise Bélanger, codirectrice  
Nicholas Ogden, membre du jury  
Julie Paré, examinatrice externe  
Mario Jacques, représentant du doyen de la FESP

## Résumé

L'infection par le virus du Nil occidental (VNO) est une maladie zoonotique qui a fait son apparition en Amérique du Nord en août 1999. Depuis cette date, elle s'est répandue sur tout le continent nord américain. Le vecteur de cette maladie est un moustique et le réservoir un oiseau. La corneille d'Amérique (*Corvus brachyrhynchos*), de la famille des Passéridés, est un oiseau commun facilement reconnaissable et détectable et qui est très sensible au VNO. Elle a été désignée par les autorités de Santé Publique comme sentinelle pour la détection des zones de circulation active du virus. Pourtant, encore beaucoup d'éléments concernant la dynamique populationnelle de cette espèce demeurent inconnus, ce qui peut rendre douteux certains aspects de l'interprétation des données de l'impact du VNO sur les populations de corneilles. L'objectif de ce travail de PhD est de palier à une partie de ces lacunes. Pour ce faire, nous avons eu à notre disposition deux séries de données. La première correspond aux données de surveillance des mortalités de corneilles pour la saison 2005 au Québec. La deuxième correspond aux données d'observations de corneilles vivantes dans le sud du Québec par les ornithologues amateurs entre 1990 et 2005. Une analyse des caractéristiques morphométriques des corneilles au Québec a été réalisée à partir des données de surveillance. Une analyse des facteurs de risques associés à la mortalité naturelle des corneilles ainsi que la mortalité associée au VNO a été également réalisée à partir de ces données. La dynamique populationnelle normale des corneilles a été décryptée depuis les données d'observations d'oiseaux vivants grâce à l'analyse spectrale. La reconstitution de cette dynamique de population pour les années au cours desquelles le VNO a circulé au Québec et la comparaison de cette reconstitution avec les données observées ont permis de décrire l'impact du VNO sur ces mêmes populations. L'analyse des données de surveillance nous a appris que les corneilles du Sud du Québec avaient des caractéristiques morphométriques variant selon l'âge et le sexe. Les données de surveillance nous ont permis de valider l'âge et la période de l'année comme facteur de risque associés à la fois à la mortalité naturelle des corneilles et à la mortalité associée au VNO. L'analyse des données d'observations d'oiseaux vivants nous a appris

que le territoire, urbain ou non urbain, semble jouer un rôle majeur dans la dynamique populationnelle des corneilles. L'impact du VNO chez les populations de corneilles semble avoir été majeur en 2003 comparativement à 2004 et 2005. Ces travaux nous apportent une meilleure compréhension des données de surveillances des mortalités de corneilles. Ils proposent également une méthode originale de surveillance d'une dynamique populationnelle à partir de données d'observations d'oiseaux vivants.

**Mots-clés** : infection par le virus du Nil occidental, corneilles d'Amérique, facteurs de risques, analyse morphométrique, mortalité naturelle, dynamique de population, analyse spectrale, surveillance.

## Abstract

West Nile Virus (WNV) infection is a zoonotic disease that appeared in North America in August 1999. Since then, it has spread throughout the continent. West Nile Virus infection is transmitted by a mosquito, and birds play the role of reservoir. The American crow (*Corvus brachyrhynchos*) is a large, easily recognized and common bird, very sensitive to the WNV. It was designated as a sentinel for WNV virus circulation in North America by Public Health authorities. However, many elements are still missing in the comprehension of the American crow population dynamics, which makes interpreting WNV effects on this population rather difficult. The principal objective of this PhD thesis is to improve our knowledge on crow population biology and dynamics in Quebec by analyzing two kinds of data. The first type of data corresponds to the 2005 WNV surveillance data in Quebec for crow mortality. The second type of data corresponds to the live crow observations data collected in southern Quebec from 1990 to 2005. With the surveillance data, we analyzed morphological characteristics of crow populations in Quebec and explored risk factors associated with baseline and WNV specific mortality. Regarding live crow data, we described natural population dynamics with spectral analysis. By comparing expected values from normal population dynamics with observed values during the WNV active years in Quebec, we were able to evaluate the WNV impact on crow populations. We observed that crow populations in Quebec were morphologically different depending on age and sex group. Age and period of year were significant risk factors associated with baseline mortality variations and WNV positive mortality variations. Territory characteristics (urban or non urban) seem to play a major role in natural crow population dynamics. The impact of West Nile Virus on crow population dynamics was more important in 2003 than in 2004 and 2005. This work contributes to our comprehension of mortality data collected during the WNV surveillance programme in Quebec in 2005. It also gives us an original and

interesting tool that is easily applied for dynamic population analysis in the context of wildlife surveillance.

**Keywords:** West Nile Virus infection, American crow, risk factors, morphological analyses, baseline mortality, population dynamics, spectral analysis, surveillance.

## Table des matières

<i>Résumé</i>	<i>iii</i>
<i>Abstract</i>	<i>v</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>xiii</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>xiv</i>
<i>Liste des sigles et des abréviations</i>	<i>xv</i>
<i>Remerciements</i>	<i>xvii</i>
<i>Introduction</i>	<i>1</i>
<i>Recension de la littérature</i>	<i>5</i>
<b>Dynamique de population de la corneille d'Amérique au Québec</b>	<b>6</b>
Milieu de vie	6
Comportement de reproduction	7
Construction du nid	7
Description et durée des principaux stades	8
Intervention des aidants ou auxiliaires	9
Devenir des jeunes à la fin de la période de reproduction	10
Territoire familial, chasse et nichoir chez la corneille	11
Comportement de migration	13
Fluctuations dans la dynamique de population	16
Origines possibles des cycles multi annuels	17
Conséquences des fluctuations intra et multi annuelles d'un point de vue épidémiologique	20
<b>La pathogénie du virus du Nil pour la corneille d'Amérique</b>	<b>22</b>
Tableau clinique chez l'oiseau	22
Paramètres influençant l'évolution de la maladie	24
Espèce	25
Infections concomitantes	25
Mode de contamination	26

Age _____	26
Age et statut des oiseaux morts _____	26
Age et statut sérologique des oiseaux vivants _____	27
Sexe _____	29
Facteurs sociodémographiques _____	29
Études sérologiques _____	30
Impact de la maladie à l'échelle d'une population _____	31
Diagnostic de laboratoire de l'infection _____	33
Diagnostic sérologique _____	33
Tests disponibles _____	33
Comparaisons _____	34
Diagnostic par détection virale _____	34
Tests disponibles _____	34
Comparaisons _____	35
Cas particulier du Vec Test appliqué à la corneille d'Amérique _____	37
<b>Surveillance du virus du Nil occidental en Amérique du Nord _____</b>	<b>41</b>
Description du système de surveillance pour le VNO en Amérique du Nord _____	41
Description générale _____	41
Surveillance de la mortalité liée au VNO dans l'avifaune du Québec _____	44
Faits soutenant la composante 'mortalité avifaune' du système de surveillance _____	46
Sensibilité du système de surveillance _____	47
Spécificité _____	50
Simplicité du système _____	51
Adaptabilité du système _____	51
Rapport Coût/ Efficacité _____	52
Limites de la composante 'mortalité aviaire' de ce système de surveillance _____	53
Éléments liés à la biologie des corvidés _____	53
Éléments liés au statut mort des oiseaux récoltés _____	54
Éléments liés au virus _____	54
Éléments liés à la population humaine _____	55
Description des résultats de surveillance obtenus au Québec entre 2001 et 2005 _____	55
Bilan de la surveillance des mortalités de corvidés _____	55
Bilan de la surveillance des cas humains _____	57

<b>Modèles de propagation du VNO au sein des populations d'oiseaux</b>	<b>60</b>
Modèles dynamiques de transmission	60
Modèle de Lord (Lord and Day 2001a; Lord and Day 2001b)	60
Modèle de Bowman (Bowman 2005)	62
Modèle de Wonham (Wonham, de-Camino-Beck et al. 2004)	64
Modèle de Cruz-Pacheco (Cruz-Pacheco, Estava et al. 2005)	66
Modèle de Thomas (Thomas and Urena 2001)	67
Modèle de Kenkre (Aguirre, Abramson et al. 2002; Kenkre, Parmenter et al. 2005)	69
Modèles infectieux spatiaux et spatio-temporels	70
Modèles spatiaux de régression et analyses d'agrégats	70
Modèle dynamique spatio-temporel de propagation du VNO	71
<b><i>Matériel, méthodes et résultats</i></b>	<b>74</b>
<b>Article 1</b>	<b>75</b>
<b>Morphological characteristics of American crow populations in southern Québec</b>	<b>75</b>
Abstract:	76
Introduction:	77
Material and Methods	78
Data collection	78
Age determination	79
Morphometric measurements	79
Statistical methods	80
Results	82
Evaluation of WNV status as a confounding variable	82
Age and gender effect on the morphological variables	82
Gender prediction	83
Gender proportion in the dead crow population	83
Discussion	83
Evaluation of WNV status as a confounding variable	83
Age and gender effect on the morphological variables	85
Gender prediction	85
Gender proportion in dead crow population	86

Limits _____	87
Acknowledgments _____	92
Bibliography _____	93
<b>Article 2 _____</b>	<b>98</b>
<b>Risk factors associated with West Nile virus mortality in crow populations in southern Quebec _____</b>	<b>98</b>
Abstract _____	99
Key Words: _____	100
Introduction _____	101
Materials and Methods _____	102
Sample collection and characterization _____	102
Determination of WNV status _____	103
Definition of time intervals _____	103
Determination of age _____	104
Determination of gender and morphological measurements _____	104
Body condition index _____	105
Classification of land cover (urban versus non-urban) _____	105
Data analysis _____	106
Analysis of baseline mortality _____	106
Risk factor analysis for WNV positive carcass mortality _____	107
BCI and gender variation according to age and WNV status _____	107
Results _____	108
Data description _____	108
Factors associated with baseline mortality _____	110
Risk factors for WNV-positive mortality _____	110
The effects of BCI and gender according to age class and WNV status _____	111
Discussion _____	112
Characteristics of baseline crow mortality _____	112
Characteristics of WNV positive crow mortality _____	113
Age and time interval _____	113
Body condition index and gender _____	116
Limits imposed by the surveillance scenario tree _____	117
Acknowledgments _____	126

Literature cited _____	126
<b>Article 3 _____</b>	<b>134</b>
<b>The analysis of crow population dynamics as a surveillance tool _____</b>	<b>134</b>
(soumis)Abstract _____	134
Abstract _____	135
Introduction _____	137
Materials and Methods _____	138
Preparation of observation data _____	138
Analysis of normal population dynamics _____	140
Surveillance of perturbations in population dynamics _____	142
Results _____	143
Normal population dynamics _____	143
Surveillance of perturbations in population dynamics _____	146
Discussion _____	147
Preparation of the bird census data _____	147
Normal population dynamics _____	148
Surveillance of perturbations in population dynamics _____	149
Acknowledgements _____	160
References _____	160
<b><i>Discussion générale et conclusion _____</i></b>	<b><i>164</i></b>
<b>Originalité du travail quant au type de données exploitées _____</b>	<b>165</b>
<b>Différences et similitudes des populations de corneilles au Québec par rapport au reste de l'Amérique du Nord _____</b>	<b>166</b>
<b>Impact du VNO sur une population de corneilles en milieu naturel _____</b>	<b>169</b>
<b><i>Bibliographie _____</i></b>	<b><i>172</i></b>
<b><i>Annexes _____</i></b>	<b><i>I</i></b>
<b>Sensibilité et Spécificité d'un test diagnostique _____</b>	<b>II</b>
<b>Mesures morphologiques chez les oiseaux _____</b>	<b>IV</b>
Longueur de l'aile _____	IV

Longueur de la queue _____	V
Longueur du bec _____	VI
Profondeur et largeur du bec _____	VI
Distance tête-bec _____	VII
Longueur du tarse _____	VIII
<b>Formulaire des données EPOQ _____</b>	<b>IX</b>

## Liste des tableaux

### Revue de Littérature

Tableau I	<i>Sensibilité et Spécificité du Vec Test® appliqué à la corneille d'Amérique</i>	P38
Tableau II	<i>Caractéristiques du VecTest® appliqué à la corneille d'Amérique sur des échantillons de tissus (cerveau, rein) ou sur des écouvillons oropharyngés.</i>	P49

### Article 1

Table III	<i>Total and Age-specific discriminant functions for gender determination of American crow carcasses in Quebec.</i>	P90
-----------	---	-----

### Article 2

Table IV	<i>Frequency distribution of crow carcasses according to gender, age class and time interval. Numbers are given for all carcasses and for WNV-positive carcasses.</i>	P123
Table V	<i>Frequency distribution of crow carcasses according to age class, WNV status and land cover (urban versus non-urban).</i>	P124
Table VI	<i>Evaluation of time interval as a risk factor in the reduced logistic regression model for predicting positive WNV status. The full model included age (SY and ASY), time interval (3 and 4) and the interaction between age and time interval (n=139).</i>	P125

### Article 3

Table VII	<i>F statistics for the statistically significant spectra for urban and non-urban areas. The period is given in months and the phase in radians.</i>	P155
-----------	--	------

## Liste des figures

### Revue de littérature

Figure 1	<i>Axes migratoires de la corneille d'Amérique</i>	P15
----------	--	-----

### Article 1

Figure 2	<i>Spatial localisation of the crow carcasses collected during the 2005 West Nile Virus surveillance programme in the South of Quebec</i>	P82
Figure 3	<i>Means and standard deviations of morphological values of crows from Quebec within each gender and age group, in 2005.</i>	P91

### Article 2

Figure 4	<i>Scenario tree for the 2005 provincially run West Nile Virus surveillance programme in Quebec (example given for the hatching-year crow population).</i>	P120
Figure 5	<i>Sampling protocol for risk factors analysis of the crow carcasses collected in southern Quebec in summer 2005.</i>	P121
Figure 6	<i>Temporal fluctuations in age specific crow mortality in summer 2005 based on data from the West Nile virus surveillance programme.</i>	P122

### Article 3

Figure 7	<i>Predicted time series of monthly crow density presented as residuals from a negative binomial models correcting for effect of year, intensity of observation and repeated site visits.</i>	P156
Figure 8	<i>Changes in standardized residuals between 1993 and 2002 for non-urban areas and urban areas with 2002 extrapolated for the American crow population.</i>	P157
Figure 9	<i>Changes in standardized residuals between 1994 and 2003 for non-urban areas and urban areas with 2003 extrapolated for the American crow population.)</i>	P158
Figure 10	<i>Changes in standardized residuals between 1990 and 2005 for non-urban areas and urban areas with 2002 to 2005 extrapolated for the American crow population.</i>	P159

## Liste des sigles et des abréviations

m = mètre

km = kilomètre

km<sup>2</sup> = kilomètre carré

g = gramme

mm = millimètre

VNO = virus du Nil occidental

WNV = West Nile Virus

ADN = acide désoxyribo-nucléique

RT-PCR = Reverse Transcription – Polymerase Chain Reaction

HY = Hatching Year

SY = Second Year

ASY = After Second Year

données EPOQ = données d'étude des populations d'oiseaux du Québec

Se = Sensibilité

Sp = Spécificité

VPP = Valeur Prédictive Positive

VPN = Valeur Prédictive Négative

*Aucun homme ne peut rien vous révéler sinon ce  
qui repose déjà à demi endormi dans l'aube de  
votre connaissance.*

*Le maître qui marche à l'ombre de temple, parmi  
ses disciples, ne donne pas de sa sagesse mais  
plutôt de sa foi et de son amour. S'il est vraiment  
sage, il ne vous invite pas à entrer dans la maison  
de sa sagesse, mais vous conduit plutôt au seuil de  
son propre esprit.*

*L'astronome peut vous parler de sa compréhension  
de l'espace, mais il ne peut pas vous donner sa  
compréhension.*

*Le musicien peut chanter pour vous la mélodie qui  
est en tout espace, mais il ne peut vous donner  
l'oreille qui saisit le rythme, ni la voix qui lui fait  
écho.*

*Et celui qui est versé dans la science des nombres  
peut parler du domaine des poids et des mesures,  
mais ne peut vous y conduire.*

*Car la vision d'un homme ne prête pas ses ailes à  
un autre homme.*

*Et de même que chacun de vous se tient seul dans  
la connaissance de Dieu, de même chacun de vous  
doit être seul dans sa connaissance de Dieu et dans  
sa compréhension de la terre.*

**Khalil Gibran (1883-1931) - Le Prophète**

## **Remerciements**

Je voudrais exprimer mes remerciements sincères à Michel Bigras-Poulin pour son encadrement, sa disponibilité et ses idées originales.

Merci à Pascal Michel pour nos discussions enrichissantes et le soutien financier à ce projet, à Denise Bélanger pour nos discussions intéressantes.

# Introduction

Le virus du Nil occidental (VNO) est un virus à ARN qui compte parmi les arbovirus les plus dispersés à travers le monde (Lanciotti 1999; Kramer and Bernard 2001). La souche New York 99 sévissant en Amérique du Nord appartient à la lignée 1 du genre Flavivirus, de la famille des Flaviviridés (Lanciotti 1999; Ostlund, Andersen et al. 2000). L'analyse de son génome a mis en évidence le fait qu'il était un très proche parent du virus du Nil occidental responsable d'une épidémie en Israël en 1998, ce qui a permis de conclure que ce virus NY99 était originaire du bassin méditerranéen (Lanciotti 1999; Giladi, Metzkor-Cotter et al. 2001) (Lanciotti 1999; Giladi, Metzkor-Cotter et al. 2001).

Le cycle épidémiologique de cet arbovirus sur le Nouveau Continent est, comme sur l'Ancien, complexe (Malkinson and Banet 2002). Il met en jeu une population de moustiques vecteurs du genre *Culex* généralement (Fonseca, Keyghobadi et al. 2004; Marra, Griffing et al. 2004), et une population réservoir d'origine aviaire dont l'identité précise reste encore inconnue car la maladie est encore trop récente sur ce continent (Marra, Griffing et al. 2004; Van Der Meulen, Pensaert et al. 2005). Les espèces aviaires qui développent une virémie suffisamment haute suite à une inoculation virale et qui pourraient donc jouer le rôle de réservoir sont nombreuses (Komar, Langevin et al. 2003). Toutefois, parmi elles, une espèce en particulier a attiré les regards : il s'agit de la corneille d'Amérique (*Corvus brachyrhynchos*). Cette espèce a constitué une sentinelle 'naturelle' pour la détection du virus du Nil peu de temps après l'apparition de ce dernier en Amérique du Nord en août 1999 (Eidson, Komar et al. 2001; Eidson, Miller et al. 2001; Komar, Panella et al. 2001). C'est sa grande sensibilité au virus qui lui a conféré ce rôle, mais aussi sa taille qui la rend facilement détectable, et sa densité importante dans les zones humainement peuplées (Marra, Griffing et al. 2004; Marzluff and Neatherlin 2006). Les résultats des programmes de surveillance basés sur la détection des mortalités liées au VNO chez les corneilles nous démontrent que ce virus a effectivement circulé de façon intense dans ces populations en Amérique du Nord en général et au Québec plus particulièrement depuis 2002 (Brown and Dallaire 2002;

Vincent, Brown et al. 2003). Certaines de ces populations suivies depuis plusieurs années ont d'ailleurs subi des pertes de 30 à 60% de leurs effectifs (Marra, Griffing et al. 2004), ce qui peut être considéré comme une réelle tragédie à l'échelle d'une espèce.

Bien qu'hôte accidentel du virus, l'homme peut lui aussi s'en trouver infecté, ce qui représente un danger réel pour sa santé. En effet, les personnes malades suite à l'infection (autour de 20% des infectés) développent, pour la plupart, des symptômes neurologiques de type encéphalites, pouvant amener jusqu'à la mort dans 4 à 18% des cas aigus (Petersen and Marfin 2002; Phalen 2004). Ainsi, au Québec, on a pu dénombrer 46 cas entre 2002 et 2006, dont 5 décès (MSSS\_Québec 2006).

Malgré la présence du virus du Nil Occidental au Québec depuis 2002 (MSSS\_Québec 2006) et la mise en place d'un programme de surveillance entre 2002 et 2005 sur le territoire québécois ayant permis, entre autres, la récolte de nombreuses données de mortalité liée au virus chez les corneilles, aucun travail n'a été mené jusqu'à présent pour relier ces résultats aux connaissances théoriques que nous avons de la biologie de l'oiseau. Or, comme le rappelle Mörner (Mörner, Obendorf et al. 2002), dans tout programme de surveillance de la faune sauvage, cette connaissance et cette compréhension de la biologie de l'espèce joue un rôle majeur dans l'interprétation des données.

L'objectif principal de ce travail de PhD est de palier à ce manque en améliorant la compréhension que nous avons de ce qu'a été la circulation du virus du Nil Occidental dans les populations de corneilles au Québec entre 2002 et 2005, au regard de la biologie de cette espèce. Les objectifs particuliers visant à satisfaire l'objectif principal sont les suivants :

- proposer une étude descriptive des caractéristiques morphométriques des corneilles du Québec;
- s'interroger sur les facteurs de risque associés à la mortalité naturelle et celle reliée au virus du Nil occidental chez ces mêmes corneilles;
- proposer une analyse de la dynamique normale des populations de corneilles vivant au Québec à partir de données d'observation ornithologique, ainsi qu'une étude de l'impact du virus du Nil occidental sur cette dynamique.

## **Recension de la littérature**

Le défi de ce travail de PhD réside en l'intégration de connaissances provenant de plusieurs domaines scientifiques qui sont les suivants : l'éthologie animale, l'infectiologie, l'épidémiologie et la modélisation mathématique. La revue de littérature suivante présente succinctement les principaux faits scientifiques de ces quatre domaines qui sous-tendent et justifient ces travaux de recherche.

## **Dynamique de population de la corneille d'Amérique au Québec**

La corneille d'Amérique (*Corvus brachyrhynchos*) a un comportement social complexe comparativement à d'autres espèces d'oiseaux. Grâce à de nombreux travaux scientifiques qui ont débuté à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle et dont les comptes-rendus écrits sont disponibles (Rhoads 1886), nos connaissances à ce sujet sont relativement complètes. Les particularités de l'éthologie de la corneille résident en son milieu de vie, son comportement reproducteur, son comportement de chasse, et son comportement migratoire.

### ***Milieu de vie***

La corneille d'Amérique fréquente les espaces ouverts (champs, pâturages) où se trouvent des haies ou une surface boisée, les forêts ouvertes, les lisières de forêts, les bordures de lacs ou de cours d'eau. En milieu urbain, elle niche dans les parcs, les cimetières, les petits boisés (Gauthier and Aubry 1995). Les caractéristiques communes à ces différents types d'environnement susceptibles d'abriter des corneilles sont la présence d'une surface dégagée associée à un ou plusieurs arbres pouvant servir de perchoir, d'abris, de support pour la construction d'un nid. Ainsi les corneilles vont éviter les milieux trop dégagés avec uniquement de la végétation basse (comme une prairie), ou, à l'opposé, vont éviter les forêts denses (Verbeek and Caffrey 2002).

Même en hiver où la corneille a tendance à délaisser son territoire de reproduction, les milieux fréquentés répondent toujours aux caractéristiques précédemment décrites (Emlen 1938; Verbeek and Caffrey 2002).

Face à l'urbanisation croissante de l'environnement, la corneille d'Amérique fait partie des espèces d'oiseaux qui ont su très bien s'adapter (Marzluff, Bowman et al. 2001). Au fil des années, elle a adopté toute une série de comportements qui lui ont permis de tirer profit de la modification de l'environnement produite par l'homme plutôt que d'en être victime, comme malheureusement, beaucoup d'autres espèces (Marzluff and Neatherlin 2006). Comme exemple d'adaptation, nous pouvons citer son régime alimentaire qui est omnivore (Hering 1934), et qui lui permet de se nourrir en ville sur les pelouses, les terrains vagues, les jardins, les dépotoirs (Gauthier and Aubry 1995). Pour illustrer enfin à quel point cette adaptation est réussie, on peut citer les travaux de recherche de McGowan (2001) qui compare les performances de l'espèce dans les zones rurale et suburbaine. Il constate que le succès reproducteur global dans les territoires suburbains est plus élevé que dans les territoires ruraux.

### ***Comportement de reproduction***

La reproduction de la corneille débute au printemps, et plus particulièrement au Québec de la mi-mars (formation des couples) au début du mois d'avril (premières pontes) (Gauthier and Aubry 1995). Chaque couple, identique année après année, se retrouve sur son territoire, lui aussi relativement stable d'une année à l'autre, pour y construire son nid (Good 1952).

### **Construction du nid**

Comme nous l'avons illustré précédemment, la corneille d'Amérique exploite de nombreux types d'habitats et c'est pourquoi la localisation de son nid peut également être très variable selon l'environnement. Aucune essence d'arbre particulière ne semble

être ciblée (Verbeek and Caffrey 2002). Toutefois, il faut que cet arbre ait une certaine hauteur et une certaine envergure car les nids se situent entre 5 et 35 m de hauteur, bien cachés, en général près du tronc (Verbeek and Caffrey 2002).

### **Description et durée des principaux stades**

Une fois le couple formé, la construction du nid commence. Elle dure environ 10 jours, mais peut durer jusqu'à 20 jours s'il s'agit d'un premier nid (Verbeek and Caffrey 2002). Plusieurs accouplements ont lieu au cours de la construction du nid (Verbeek and Caffrey 2002) et comme il est difficile de savoir lequel de ces derniers a été fécondant, il est difficile de juger de la durée entre l'accouplement et la ponte. Le sperme du mâle peut être conservé de 7 à 14 jours chez les femelles poulets, et plus de 21 jours chez les femelles dindes, afin de féconder des ovules dans l'infundibulum (Causey Whittow 2000). Cette durée n'est pas connue spécifiquement pour la corneille. Une fois l'ovule fécondé, il met seulement quelques heures pour descendre l'oviducte et être pondus (Causey Whittow 2000). Divers travaux nous donnent les durées observées entre la fin de la construction du nid et la ponte chez la corneille : les œufs peuvent être pondus d'immédiatement à 5, voir 15 jours après la fin de la construction du nid (Emlen 1942; Kilham 1984; Clark, James et al. 1991).

La taille de la ponte est de 3 à 7 œufs (Verbeek and Caffrey 2002). Une fois les œufs pondus, la couvaison (incubation) dure de 16 à 23 jours et si l'éclosion n'a toujours pas eu lieu au bout de 28 jours, les œufs stériles sont abandonnés (Verbeek and Caffrey 2002). Si la première ponte est un échec (soit parce que les œufs étaient stériles, soit parce qu'ils ont été détruits, ou autre), une deuxième ponte est immédiatement retentée, et en général dans un nouveau nid situé dans un rayon de 60 mètres autour de l'ancien (Emlen 1942). Ce phénomène de deuxième ponte est loin d'être anecdotique dans la reproduction de la corneille car il est à l'origine d'autant d'oisillons que la première ponte (Emlen 1942). Aucun élément de la littérature ne semble indiquer que la durée de couvaison pour une deuxième ponte soit différente de celle d'une première ponte. La

couvaison est effectuée par la femelle qui ne quitte presque jamais le nid. Les œufs éclosent et donnent naissance à de petits oisillons aveugles, recouverts d'un léger duvet et incapables de voler. À leur naissance, ces oisillons pèsent autour de 15 grammes (Ignatiuk and Clark 1991) et restent au nid durant 9 à 14 jours (Emlen 1942). À la fin de cette période, les oisillons pèsent autour de 300 grammes (Emlen 1942; Good 1952). Ils prennent leur envol définitif 25 à 30 jours après leur éclosion autour du nid (Emlen 1942).

### **Intervention des aidants ou auxiliaires**

La corneille d'Amérique fait partie des espèces d'oiseaux possédant un comportement de coopération entre individus au moment de la saison de reproduction. En effet, que ce soit pour construire le nid, pour nourrir la femelle qui incube ou pour nourrir les oisillons au nid, le couple est supporté par un ou plusieurs aidants ou auxiliaires. Ces aidants sont des corneilles nées généralement du même couple, mais l'année précédente (Kilham 1984). Même si la majorité des aidants sont de jeunes corneilles âgées de 1 an, on peut également rencontrer des aidants de 2, 3, 4 ou même 5 ans (mais cela devient très rare) (Caffrey 1992; McGowan 2001). Les aidants ne se reproduisent pas et, selon une étude réalisée en Californie, semblent être plus souvent des femelles que des mâles (Caffrey 1992).

Il est communément admis que ce phénomène de coopération lors de la reproduction a l'avantage d'améliorer le succès de reproduction du couple en lui assurant un soutien technique et alimentaire (Verbeek and Caffrey 2002), tout en garantissant aux aidants une occasion pour apprendre à élever des jeunes (Caffrey 1992). Il a également comme conséquence de décaler l'âge de la maturité sexuelle chez la corneille : tant qu'un individu n'a pas de territoire, il ne peut tenir que les rôles d'aidant ou de vagabond et il ne peut se reproduire (Verbeek and Caffrey 2002).

### **Devenir des jeunes à la fin de la période de reproduction**

Entre 1 et 2 mois après leurs premiers vols, les jeunes se dispersent (Verbeek and Caffrey 2002). À ce stade-ci, les aidants ne sont plus utiles sur le territoire familial et se dispersent également. La dispersion se fait soit de façon définitive (c'est-à-dire que l'individu quitte le territoire familial pour toujours), soit de façon provisoire (il y retourne l'année suivante pour aider ses parents ou pour s'y reproduire car ses parents l'ont laissé vacant). Les corneilles qui se dispersent ont tendance à se regrouper, et à former des voiliers de non-reproducteurs. Dans ces voiliers, on trouve mélangés les jeunes de l'année et les aidants (Caffrey 1992). Dans un travail très original réalisé par Marzluff sur des populations de corneilles dans l'état de New York, il a été démontré que la dispersion des jeunes se faisait dans le sens du milieu non-urbain (là où se trouve la majorité des territoires familiaux) vers un milieu urbain. Ces groupes de jeunes vont y parfaire leur éducation grâce à une nourriture plus facilement accessible qu'en milieu rural (Marzluff, McGowan et al. 2001). Ce travail a été partiellement validé par une étude réalisée en Illinois. Cette deuxième étude a montré une différence significative entre les habitats fréquentés par les jeunes, les aidants et les adultes, correspondant à une préférence pour les territoires urbains et sub-urbains pour les deux premières catégories d'âge et pour les territoires ruraux et forestiers pour la troisième catégorie d'âge (Yaremych, Novak et al. 2004).

Ce type de migration en fin de saison de reproduction des jeunes vers des territoires vacants n'est pas spécifique à la corneille d'Amérique : on le retrouve chez d'autres espèces d'oiseaux comme le Grand Héron bleu (*Ardea herodias*), le Pygargue à tête blanche (*Haliaeetus leucocephalus*), le canard branchu (*Aix sponsa*), la Paruline polyglotte (*Icteria virens*), et le Pélican d'Amérique (*Pelecanus erythrorhynchos*) (USGS 2006).

### ***Territoire familial, chasse et nichoir chez la corneille***

La corneille est un oiseau qui se déplace beaucoup au cours de sa vie. Il existe trois entités territoriales principales entre lesquelles ces déplacements ont lieu : territoire familial, zones de chasse et nichoir. La présente revue de littérature recherchera à dresser le portrait général de ces déplacements.

Le territoire familial correspond à la surface centrée sur le nid et qui est défendue par le couple reproducteur et les aidants au cours de la saison de reproduction et uniquement par le couple reproducteur à la fin de celle-ci. Ces territoires sont exclusifs : ils ne se chevauchent pas ou peu (Verbeek and Caffrey 2002). Ils sont choisis de façon à contenir ou à être proche d'une zone de chasse (ressources alimentaires disponibles), à contenir un arbre assez haut et à large branches pour supporter le nid, et enfin à être assez loin d'une activité humaine pour éviter le dérangement lors de la reproduction (Good 1952). La taille du territoire peut varier. Dans certaines régions, on observe que les nids sont regroupés en colonies. Dans ce cas, les distances entre les nids sont relativement réduites (de 25 à 70 m) (Verbeek and Caffrey 2002). Mais plus l'espace disponible pour la corneille augmente, plus la taille du territoire augmente. Ainsi, en comparant la densité en territoire entre les milieux urbain et non-urbain, McGowan constate que celle-ci est de 11,5 territoires par km<sup>2</sup> en milieu urbain et 2,6 territoires par km<sup>2</sup> en milieu non-urbain (McGowan 2001). Si on se réfère à d'autres études réalisées dans des environnements plutôt ruraux, on relève des tailles de 2 à 3 km<sup>2</sup> par territoire (Sullivan and Dinsmore 1992; Verbeek and Caffrey 2002).

Selon la taille du territoire, celui-ci pourra contenir ou non la zone de chasse principale de la corneille. On entend par chasse la recherche de nourriture. Comme la corneille est omnivore, cela peut consister, en proportions variables en fonction des saisons, en la recherche de grains, de fruits, d'insectes, etc (Hering 1934). Certains auteurs ont constaté qu'en zone rurale, la zone d'activité diurne (ou zone de chasse) de la corneille se situe dans un rayon de 700 m autour du nid, soit, à l'intérieur même du

territoire (Sullivan and Dinsmore 1992). Mais dans le cas de territoire réduit, comme lorsque les nids sont regroupés en communauté, les corneilles iront 'chasser' plus loin. Les distances qu'elles peuvent parcourir sont alors variables: 2,1 km (Sullivan and Dinsmore 1992), 4,8 km (Schaefer 1983).

La dernière grande entité territoriale et comportementale qui caractérise la corneille est le nichoir. Il se situe près d'une surface en eau fraîche dégagée et à faible altitude (Emlen 1938). Il correspond au regroupement d'une dizaine à plusieurs milliers d'individus pour y passer la nuit (Rhoads 1886; Emlen 1938; Good 1952). Les nichoirs fréquentés en hiver et en été ne sont pas forcément les mêmes, de même que le type d'arbre sur lesquels ils sont situés : les arbres à feuille permanentes sont préférés en hiver et inversement en été (Gorenzel and Salmon 1995). La corneille arrive au nichoir le soir et en repart le matin vers les zones de chasse ou vers le territoire familial (Caccamise, Reed et al. 1997; Moore and Switzer 1998). La distance possible entre la zone de chasse et le nichoir est très variable, une étude l'a mesurée entre 40 et 80 km (Good 1952). La fonction du nichoir réside certainement en l'acquisition d'une meilleure résistance à la prédation (effet protecteur du groupe au sein duquel les individus au centre sont protégés par les individus en périphérie), ainsi qu'un échange d'informations (concernant les lieux de nourrissage par exemple) même si les auteurs se contredisent sur le sujet (Caccamise, Reed et al. 1997). À l'arrivée au nichoir, la corneille va régurgiter les pelotes correspondant aux parties indigestes des aliments ingurgités au cours de la journée (Good 1952).

Que ce soit envers leurs territoires, leurs nichoirs, ou envers leurs zones de chasse, les corneilles sont fidèles (Verbeek and Caffrey 2002). Année après année, certains auteurs ont remarqué que les corneilles auront tendance à reconstituer leur nichoir d'hiver au même endroit, même s'il s'avère exister un lieu plus accueillant ailleurs (Emlen 1938; Emlen 1940; Good 1952). Les chemins empruntés pour se déplacer entre ces trois entités semblent identiques, jours après jour (Good 1952). Il

n'existe pas ou peu de chevauchement spatial entre ces trois entités territoriales, sauf parfois entre territoire et zone de chasse, comme discuté précédemment.

Il existe de grandes fluctuations quant à la fréquentation des entités territoriales décrites plus haut. Le temps passé dans chacune de ces trois grandes entités va varier en fonction de la saison et en fonction de l'âge de l'individu. En saison de reproduction (printemps), l'activité de la corneille est centrée essentiellement autour du territoire familial. Les adultes reproducteurs y passent la journée et la nuit, et les aidants aussi, même si certains peuvent quitter le territoire la nuit pour rejoindre un nichoir (Caccamise, Reed et al. 1997; Verbeek and Caffrey 2002). Une fois les jeunes de l'année suffisamment indépendants (milieu été), ils quittent le territoire familial pour rejoindre un groupe de chasse de jour et un nichoir nocturne, accompagnés souvent par les aidants, alors que les adultes restent sur le territoire familial (Good 1952; Caffrey 1992). Ainsi, alors que le printemps est la saison au cours de laquelle les agrégats de corneilles sont peu ou pas existants, ils recommencent à se former à la saison d'été avec les jeunes principalement. À la fin de l'été et au début de l'automne, les adultes quittent progressivement les territoires familiaux pour former des groupes allant passer la nuit en nichoir. Ainsi, les nichoirs augmentent en taille progressivement de septembre à janvier, puis diminuent de février à mars (Good 1952). Donc si l'agrégation des corneilles est minimale au printemps, elle est maximale en hiver, au cours du mois de janvier. Si le ratio des sexes au sein de ces agrégats semble équitablement distribué entre mâles et femelles, le regroupement, lui, semble fait par classe d'âge : les jeunes et les vieux forment des groupes distincts qui se mélangent peu, sauf au printemps (Good 1952).

### ***Comportement de migration***

Comme décrit précédemment, les déplacements de la corneille au cours de sa vie sont nombreux. Déplacement quotidien à la recherche de nourriture, déplacement en fin de saison de reproduction des jeunes depuis le territoire familial vers d'autres milieux. Ce dernier type de déplacement 'intra-saisonnier', même s'il peut faire parcourir à la

corneille des dizaines de kilomètres, n'est pas considéré comme un déplacement de migration au sens strict car il est réalisé chaque année par la même classe d'âge dans la population mais pas par les mêmes individus (USGS 2006).

La corneille est considérée comme un oiseau sédentaire sur une grande partie du territoire d'Amérique du Nord. Mais au-delà d'une certaine latitude, qui correspond grossièrement à la frontière entre le Canada et les États-Unis, c'est un oiseau migrateur (Verbeek and Caffrey 2002). En réalité, la transition entre comportement sédentaire et migratoire ne se fait pas de façon brutale. Elle se fait de façon progressive de telle sorte que plus on monte au Nord plus le pourcentage de corneilles se déplaçant au Sud au cours des mois d'hiver va augmenter. L'évolution de la proportion de corneilles migrantes versus corneilles sédentaires en fonction de la latitude est très peu documentée dans la littérature. Les déplacements migratoires de la corneille se font en bande d'individus, en général du même âge (Good 1952). Il a été observé également que les individus les plus jeunes avaient tendance à migrer plus fréquemment en hiver et plus loin au Sud que les individus les plus âgés (Good 1952). Les déplacements migratoires différents selon le groupe d'âge ont été observés dans d'autres espèces comme la Tourterelle triste (*Zenaida macroura*) et l'Épervier brun (*Accipiter striatus*) (USGS 2006).

L'aire de répartition des corneilles d'Amérique susceptibles de migrer pour la saison hivernale est située entre la côte est et l'est des montagnes rocheuses et est limitée au sud par le nord des États-Unis. Les voies migratoires empruntées par ces corneilles sont fonctions de leur lieu de nidification : si celui-ci se trouve à l'ouest du territoire nord américain, les corneilles sont forcées à suivre un axe Nord-Ouest/Sud-Est pour descendre vers le sud en hiver (axe migratoire ouest), alors que si celui-ci se trouve à l'est, les corneilles suivent un axe NordEst/SudOuest (axe migratoire est) (Good 1952; Rappole, Derrickson et al. 2000). La longueur des distances migratoires parcourues est plus importante pour un oiseau empruntant l'axe ouest que l'axe est (1600 à 2250 km versus quelques centaines de km) (Good 1952). La zone d'arrivée de l'axe migratoire est

correspond à la « Corn Belt » des États-Unis (au sud de la région des Grands Lacs), alors que la zone d'arrivée de l'axe migratoire Ouest correspond au centre des États-Unis. Les deux voies migratoires ne se chevauchent donc apparemment pas, comme cela est indiqué dans la Figure 1 ci-dessous (Good 1952; Brewer, Diamond et al. 2000).



Figure 1 : Axes migratoires de la corneille d'Amérique (d'après (Good 1952)).

Les vitesses de déplacement lors des déplacements migratoires de la corneille ne sont pas très élevées comparativement à d'autres espèces d'oiseaux: autour de 40 km par heure (Good 1952). Les déplacements ont lieu le jour. La nuit, les corneilles font une halte et se regroupent en nichoir (Good 1952). Il semblerait que les migrations diurnes

concernent surtout les gros oiseaux comme les canards, les oies, les mouettes, les pélicans, les buses. En effet, même les oiseaux habituellement diurnes, en dessous d'une certaine taille, auront tendance à effectuer leurs déplacements migratoires la nuit, ceci probablement pour éviter la prédation, comme les bruants, viréos, parulines, et grives (USGS 2006).

Les migrations dans le sens Nord-Sud s'effectuent de septembre à janvier et dans le sens Sud-Nord de janvier à mars. En général, l'arrivée des voiliers de corneilles au printemps est beaucoup plus visible que leurs départs en automne car elle a lieu sur une plus courte période (Good 1952). On connaît peu de choses sur les stimuli entraînant le départ des oiseaux dans le sens Nord-Sud, même si on suspecte la température et la durée d'ensoleillement de jouer un rôle (USGS 2006). Concernant les corneilles, il a été émis l'hypothèse que le gel des grandes étendues d'eau avait un rôle dans le déclenchement des mouvements migratoires (Good 1952). Dans le sens Sud-Nord, on sait que la variation de la longueur du jour active le mécanisme de départ des oiseaux vers leurs territoires de reproduction plus au Nord mais aucune hypothèse n'a été validée spécifiquement pour la corneille (USGS 2006).

### ***Fluctuations dans la dynamique de population***

Les paragraphes précédents ont décrit en détail la dynamique populationnelle des corneilles au sein d'une même année. Cette dynamique va engendrer des fluctuations intra annuelles des densités de corneilles en fonction de la saison et du territoire observé.

De nombreuses espèces animales, mammifères ou oiseaux notamment, exhibent, en plus de ces fluctuations intra annuelles, des fluctuations multi annuelles. Comme rien à l'heure actuelle ne nous permet d'affirmer que ces cycles multi annuels n'existent pas chez la corneille d'Amérique, les points suivants vont présenter les origines possibles de ces cycles selon des travaux effectués sur d'autres espèces animales sauvages, ainsi que leurs conséquences potentielles d'un point de vue épidémiologique.

## Origines possibles des cycles multi annuels

### ■ Rôles des agents pathogènes

Il a été observé et validé que la mortalité/ morbidité lié à un agent pathogène circulant dans une population pouvait engendrer l'apparition de cycles multi annuels dans cette population.

Selon une étude réalisée sur une population de lagopède d'Écosse (*Lagopus lagopus scoticus*), il existe dans cette population des cycles de période variant de 4 à 5 ans (Dobson and Hudson 1992). La variation des périodes de ces cycles pourrait être causée par les interactions existant entre les lagopèdes et un vers parasite nématode présent dans cette population (*Trichostrongylus tenuis*). Plus précisément, il semblerait que l'augmentation du taux de reproduction dans la population de lagopède pourrait diminuer la période de ces cycles, alors que l'augmentation de la durée du stade vie libre du parasite dans l'environnement ou du stade de dormance du parasite enkysté dans le lagopède pourrait augmenter la période de ces cycles. Les auteurs ont d'ailleurs pu établir que si le stade de dormance du parasite excédait 6 mois, toute cyclicité multi annuelle disparaissait dans la dynamique de population des lagopèdes.

Une autre étude a modélisé l'impact de la durée d'infertilité post-infection L (pour 'Length') dans une population de campagnols (*Microtus agrestis*), suite à une infection par le virus de la vaccine de la vache (Smith, White et al. 2008). L'hypothèse de base de ce travail réside dans le fait que, suite à une épidémie, la reproduction d'une population est freinée car une partie des individus en état de récupération physique post-infection est incapable de se reproduire pendant une durée L. Les résultats de cette étude ont démontré que, en fonction de la durée de la période L, on pouvait voir apparaître des cycles multi annuels dans la dynamique de population des petits mammifères. Par exemple, une période L de 189 jours engendrerait un cycle de 4 ans, alors qu'une période L de 564 jours engendrerait un cycle de 2 ans.

### ■ Rôle de l'environnement

Les fluctuations des paramètres environnementaux sont une cause majeure de cyclicité dans les dynamiques de populations.

Les fluctuations environnementales à haute fréquence (qui peuvent être exprimées par du bruit blanc dans une série chronologique) peuvent être responsables, entre autre, d'un changement de l'amplitude des fluctuations observées dans les dynamiques de population et de la variance globale dans les densités de cette même population (Greenman and Benton 2003).

Les travaux de Bierman (Bierman, Fairbairn et al. 2006) et de Hansen (Hansen, Stenseth et al. 1999) démontrent que la variation dans la rigueur de l'hiver d'une année à l'autre était un élément clé dans la genèse de cycles multi annuels dans une dynamique de population.

Le réchauffement climatique global sur la planète semble avoir un impact sur les paramètres biologiques de nombreuses espèces : modification des dates de migrations dans le sens Nord-Sud et Sud-Nord pour 20 espèces d'oiseaux au Royaume-Uni (Cotton 2003), modification de la date et de la taille des pontes au cours des 30 dernières années chez de nombreuses espèces d'oiseaux en Amérique du Nord (Winkler, Dunn et al. 2002). Il est très plausible que la modification de ces paramètres biologiques puisse influencer la dynamique de ces populations avec une modification des cycles annuels ou multi annuels en présence.

Les phénomènes climatiques à basse fréquence très connus que sont les oscillations ENSO (El Niño Southern Oscillation) et NAO (North Atlantic Oscillation) ont un impact reconnu dans la genèse de fluctuations à basse fréquence dans la dynamique populationnelle de nombreuses espèces animales dont les chouettes (Stenseth, Mysterud et al. 2002), les gobes mouches (Stenseth, Mysterud et al. 2002) et la paruline bleue (Scott Sillet, Holmes et al. 2000).

■ Rôle des phénomènes densité-dépendant;

De nombreux travaux ont étudié l'impact de la taille d'une population à une date  $t$  sur la taille de celle-ci à une date  $t+n$ . Ces travaux ont mis en évidence l'apparition de cycles multi annuels dans un modèle de population prenant en compte ce type de régulation 'densité-dépendant'.

Les travaux effectués par Smith (Smith, White et al. 2006) pour étudier les cycles multi annuels observés dans des populations de campagnols (*Microtus agrestis*) ont pu démontrer que si la durée de la période de reproduction au cours d'une année était fonction de la densité de population à des dates ultérieures, alors on pouvait voir apparaître dans la dynamique de population globale des cycles multi annuels de périodes pouvant varier de 3 à 10 ans, selon la longueur du délais entre la saison de reproduction et l'année ultérieure l'influençant.

Les travaux de Hansen (Hansen, Stenseth et al. 1999) ont montré que le taux de croissance d'une population à l'issue de l'hiver (année  $n$ ) était relié d'une part à la rigueur de l'hiver traversé mais aussi à la densité de la population à l'automne précédent (année  $n-1$ ) et au printemps deux années auparavant (année  $n-2$ ). Selon Hansen, ces phénomènes de densité-dépendance engendrant des cycles multi annuels de période oscillant entre 4 et 5 années, ne seraient pas reliés uniquement à la densité de populations de proie mais également à celle des prédateurs (ce qui pourrait expliquer l'effet des densités de proie durant un printemps sur le taux de croissance post-hivernal deux années plus tard).

Les travaux présentés par Bierman (Bierman, Fairbairn et al. 2006) complètent ce point de discussion en soulignant le fait que s'il existe de l'autocorrélation temporelle entre les densités de populations, cette autocorrélation peut aussi être mise en évidence d'un point de vue spatial avec l'observation de 'vagues' dans la distribution spatiale des densités de populations.

La plupart du temps, les fluctuations multi annuelles dans les densités de population sont liées à plusieurs phénomènes qui agissent concomitamment comme le soulignent les travaux de Hansen (Hansen, Stenseth et al. 1999) qui prennent en compte des phénomènes météorologiques et densité-dépendant pour modéliser les fluctuations dans la dynamique de population d'une espèce de campagnol (*Clethrionomys rufocanus*).

### **Conséquences des fluctuations intra et multi annuelles d'un point de vue épidémiologique**

La connaissance des fluctuations intra et multi annuelles dans une dynamique de population est un élément majeur si l'on se place d'un point de vue épidémiologique. En effet, l'augmentation des densités de populations engendre l'apparition de conditions souvent très favorables à la transmission d'agents infectieux. Ceci a été démontré par les travaux de Hosseini (Hosseini, Dhondt et al. 2004) et de He (He and Earn 2007) qui démontrent l'impact de l'apparition au sein d'une population de nombreux animaux susceptibles suite à la reproduction sur la dynamique de transmission de maladies (fluctuations temporelles). Hosseini met également en évidence dans ses travaux l'impact de l'agrégation spatiale des animaux sur des territoires restreints pour la recherche de nourriture dans la dynamique de transmission d'agents infectieux (Hosseini, Dhondt et al. 2004) (fluctuations spatiales).

En conclusion, nous pouvons rappeler les faits essentiels suivants :

- La corneille d'Amérique est un oiseau adapté à la fois au milieu rural et au milieu urbain;
- Au cours de la reproduction, elle met en œuvre un système de coopération entre les individus de différentes classes d'âge;
- Au cours de sa vie, la corneille est amenée à se déplacer beaucoup, que ce soit pour la recherche de nourriture, pour la migration post-reproduction vers des territoires vacants, ou encore pour les migrations saisonnières (en hiver vers le Sud et au printemps vers le Nord);
- La corneille est un oiseau grégaire qui, en dehors de la période de reproduction, se regroupe en nichoir la nuit, et part chasser en groupe le jour;
- Même si cela n'a pas été démontré à l'heure actuelle, il pourrait exister des fluctuations multi annuelles dans la dynamique de population des corneilles, comme dans d'autres espèces d'oiseaux ou de mammifères.

## **La pathogénie du virus du Nil pour la corneille d'Amérique**

La souche du virus du Nil occidental (VNO) apparue en Amérique du Nord en août 1999 est la première souche de VNO à s'être développée sur le nouveau continent. Les populations animales, et parmi celles-ci les populations de corneilles, étaient donc naïves, c'est-à-dire exposées pour la première fois au virus (McLean, Ubico et al. 2002). Alors que dans d'autres régions du globe, comme l'Europe, l'infection par le VNO chez les corneilles n'est peu ou pas symptomatique, c'est loin d'être le cas en Amérique du Nord (Malkinson and Banet 2002).

### ***Tableau clinique chez l'oiseau***

Les symptômes cliniques décrits dans la littérature ne sont pas décrits spécifiquement pour les corneilles, mais pour des groupes d'oiseaux incluant des oiseaux de la famille des Corvidés (ordre des Passériformes), dont la corneille d'Amérique. Les symptômes généraux observés chez ces oiseaux sont de l'anorexie, une faiblesse générale forçant l'oiseau à beaucoup dormir ou rester au repos, une perte de masse, et du pinçage des plumes à pulpe (Glaser 2004; Marra, Griffing et al. 2004). Comme le VNO est un virus neurotrope, on peut observer également de nombreux symptômes neurologiques associés aux symptômes généraux, qui sont : ataxie, tremblements, désorientation, déplacement en cercle, vision et audition altérées, positionnements anormaux de la tête et du cou, convulsions (Steele, Linn et al. 2000; Glaser 2004; Marra, Griffing et al. 2004).

Selon une étude d'infection expérimentale par le VNO (souche NY99 qui correspond à la souche nord américaine) effectuée sur de nombreuses espèces d'oiseaux, il semblerait que la famille des Corvidés, incluant la corneille d'Amérique, soit particulièrement sensible au VNO (Komar, Langevin et al. 2003). Lors d'une autre étude

réalisée spécifiquement sur la corneille d'Amérique au cours de laquelle on comparait la pathogénie de différentes souches de VNO à la souche NY99, on a pu observer, suite à une inoculation de la souche NY99 par injection sous-cutanée, une durée de survie chez cet oiseau de 6 jours maximum, avec un taux de mortalité de 100% (Brault, Langevin et al. 2004). Ces deux séries de résultats concordent. Que l'inoculation virale ait été réalisée par injection sous-cutanée, piqûre de moustiques infectés, ingestion de virus ou contact, la virémie est maximale après 5 jours et atteint des taux équivalents quelque soit le mode de contamination (Komar, Langevin et al. 2003; Brault, Langevin et al. 2004). Selon un indice de compétence vectoriel basé sur la concentration en particules virales dans le sang et la durée du pic de virémie, la corneille d'Amérique arrive au 4<sup>ème</sup> rang derrière le Geai bleu, le Quiscale commun, et le Roselin familier, parmi les 25 espèces testées, faisant d'elle un bon réservoir pour le VNO (Komar, Langevin et al. 2003).

Outre le sang, le virus se répand dans plusieurs organes. Chez la corneille d'Amérique, on a pu détecter la présence de virus dans le cerveau, le cœur, la rate, le foie, les reins, les glandes surrénaliennes, les intestins et le pancréas (Steele, Linn et al. 2000). Il a aussi été mis en évidence dans la peau et les gonades (Komar, Langevin et al. 2003). De même, le VNO a été mis en évidence en quantité importante dans des échantillons cloacaux et trachéaux, ce qui démontre que, chez la corneille, le virus est excrété dans les fèces et sécrété dans le mucus respiratoire (Komar, Langevin et al. 2003). Il a aussi été mis en évidence dans la pulpe des plumes chez les Corvidés infectés (Docherty, Long et al. 2004).

Les lésions que l'on peut observer chez les Passériformes (dont fait partie la corneille d'Amérique) sont les suivantes (Steele, Linn et al. 2000; Gibbs, Ellis et al. 2005):

- Atteinte des tissus de la boîte crânienne avec hémorragie dans les tissus cérébraux en particulier le calvarium (partie intérieure des os crâniens) et les méninges, congestion du cerveau, encéphalomalacie;

- Atteinte du cœur (épicardite, myocardite, endocardite, hémorragie);
- Atteinte du tractus digestif (hémorragie gastro-intestinale, hémorragie du pancréas, hépatite, congestion du foie ou hémosidérose);
- Atteinte des poumons (hémorragie);
- Atteinte du système urinaire (congestion ou hémorragie des reins, dégénérescence tubulaire);
- Atteinte du système hématopoïétique (splénomégalie, leucocytose mononucléaire, vasculite et périvasculite).

À ces lésions spécifiques, il faut rajouter que la grande majorité des carcasses avaient un état de chair diminué (oiseaux maigre à légèrement maigre) (Steele, Linn et al. 2000; Gibbs, Ellis et al. 2005). Toutefois, il n'est pas toujours évident que les lésions précédemment citées se retrouvent systématiquement sur des corneilles mortes du VNO. En effet, au cours des autopsies réalisées sur ces oiseaux durant les saisons de surveillance 2001 et 2002 au Québec, rares étaient les carcasses positives qui présentaient une de ces lésions (Brown and Dallaire 2001; Brown and Dallaire 2002; Dallaire 2007).

Chez les oiseaux survivants à l'infection, il est observé des séquelles importantes concernant le système nerveux, les reins, le pancréas, et le cœur. Les oiseaux qui n'ont présenté aucun signes cliniques au cours de la maladie ne sont pas forcément indemnes de lésions internes (Petersen and Marfin 2002; Marra, Griffing et al. 2004).

### ***Paramètres influençant l'évolution de la maladie***

Concernant les facteurs de risques associés à l'infection par le VNO, il est difficile de trouver des références bibliographiques spécifiques à la corneille d'Amérique. C'est pourquoi nous allons discuter toutes les données existantes, quelque

soit la famille d'oiseau, tout en apportant une attention particulière aux oiseaux de la famille des Corvidés, famille de la corneille d'Amérique.

### **Espèce**

De très nombreuses espèces d'oiseaux ont été rapportées comme positives au virus en Amérique du Nord depuis 1999 (317 espèces au 27 juillet 2007) (CDC 2007). Parmi celles-ci, certaines semblent développer une virémie importante suite à l'infection, ainsi que des signes cliniques graves amenant souvent à la mort de l'oiseau. Certaines de ces familles très sensibles au virus ont été identifiées : Corvidés, Ictéridés, Fringillidés, Passéridés, Larinés, Turdidés, Falconidés, Strigidés, Anatidés, Columbides (Komar, Langevin et al. 2003). La corneille d'Amérique ainsi que le Geai Bleu se retrouvent dans la famille des corvidés. Ces deux espèces, avec le Grand corbeau, ont démontré par la suite une grande sensibilité au virus sur le terrain, qui a fait qu'elles aient été désignées comme espèces sentinelles pour les programmes de surveillance aviaire pour le VNO en Amérique du Nord (Brown and Dallaire 2002; Brownstein, Holford et al. 2004; Brown, Côté et al. 2005).

Une autre étude réalisée dans la ville de New-York suite à la première épidémie d'août 1999 a mis en évidence que les espèces non-indigènes (originaires d'Afrique ou d'Eurasie) avaient tendance à développer des signes moins graves de la maladie après infection par le VNO que les espèces indigènes de l'Amérique du Nord. Une telle observation a été commentée comme étant la conséquence de la cohabitation des espèces non-indigènes depuis longtemps avec le virus en Afrique ou en Eurasie, ce qui leur a permis de développer une certaine résistance à ce dernier (Ludwig, Calle et al. 2002).

### **Infections concomitantes**

Dans une étude réalisée dans la ville de New-York suite à l'épidémie d'août 1999, parmi les 8 oiseaux nécropsiés de l'ordre des Passériformes (dont fait partie la famille des Corvidés), 3 avaient une infection concurrente au VNO. Pour deux oiseaux,

il s'agissait d'une intoxication au Brodifacoum (un anti-coagulant), et pour le troisième, il s'agissait d'une infection à Poxvirus. Rien ne nous indique si ces maladies concurrentes ont précédées ou suivies l'infection par le VNO (Steele, Linn et al. 2000).

Une étude réalisée avec la corneille d'Amérique spécifiquement, a démontré que des oiseaux préalablement infectés par le virus Kunjin (souche virale du virus du Nil Occidental en Australie et au Kenya) et ayant développés des anticorps neutralisants suite à cette infection, deviennent protégés à 100% de l'issue létale d'une infection par le VNO souche NY99 (Brault, Langevin et al. 2004). L'infection au préalable de la corneille par le virus Kunjin aurait donc agit comme un vaccin prévenant les signes cliniques graves associés au virus NY99.

### **Mode de contamination**

Selon le mode d'inoculation du virus chez la corneille d'Amérique, il peut exister un délai entre l'inoculation et le début de la virémie. Si l'inoculation a été réalisée par piqûre de moustique ou par injection sous-cutanée, la virémie démarre immédiatement. Si l'inoculation a été réalisée par ingestion orale, il existe un délai de 1 jour avant le début de la virémie. Enfin, si l'inoculation a été réalisée par contact (mise en cage commune d'individus sains et infectés sans intervention possible de vecteurs arthropodes), alors il existe un délai de 5 jours avant le début de la virémie. Mais quelque soit le mode d'inoculation, la hauteur de la virémie et la durée des signes cliniques avant le décès de la corneille restent identiques (Komar, Langevin et al. 2003).

### **Age**

Concernant le rôle de l'âge dans le statut de la corneille d'Amérique vis-à-vis du VNO, les résultats sont contradictoires.

#### *Age et statut des oiseaux morts*

Selon l'étude d'une cohorte de corneilles vivantes en Illinois en 2002, il n'existe pas de relation significative entre la classe d'âge de l'oiseau et le fait qu'il meure du VNO au cours de l'étude (Yaremych, Warner et al. 2004). Mais cette étude a été réalisée avec un échantillon de 19 corneilles (problème de puissance) et sans prendre en compte la date à laquelle les corneilles sont mortes.

Une autre étude réalisée dans l'Ohio, en 2002, sur le Geai bleu, démontre que les proportions de carcasses positives pour le VNO parmi les carcasses ramassées au cours de l'été étaient différentes selon la classe d'âge à laquelle appartenait la carcasse. Ainsi, au cours du mois de juin, les proportions de carcasses positives parmi les geais adultes étaient les mêmes que parmi les geais jeunes de l'année, alors que durant le mois d'août, cette proportion était plus élevée chez les adultes que chez les jeunes. Ce qui semble dire qu'à cette période de l'année, les adultes geai bleu semblent plus à risque de mourir du VNO que les jeunes (Garvin, Tarvin et al. 2004).

Au Canada, au cours des programmes de surveillance du VNO en Ontario depuis 2001, et au Québec en 2003 et en 2004, il a été observé que la quantité de carcasses positives de corneilles adultes était plus élevée que celle de jeunes corneilles de l'année (Vincent, Brown et al. 2003; Vincent and Brown 2004; Barker and Massey 2007).

#### *Age et statut sérologique des oiseaux vivants*

Une étude réalisée en Illinois au cours de l'année 2002, mais non-ciblée sur la corneille d'Amérique, nous montre que la quantité d'oiseaux séropositifs pour le VNO ne diffère pas selon l'âge de l'oiseau (Ringia, Blitvich et al. 2004).

Selon deux études réalisées sur des échantillons comprenant plusieurs espèces d'oiseaux dont la corneille d'Amérique la probabilité d'obtenir un individu positif pour le VNO augmente avec l'âge de l'oiseau (Ludwig, Calle et al. 2002; Gibbs, Allison et al. 2006).

Selon une étude menée sur le Geai bleu (proche parent de la corneille d'Amérique), entre 2001 et 2004 en Illinois, la probabilité d'obtenir un individu séropositif pour le VNO est plus élevée chez les jeunes que les adultes (Beveroth, Ward et al. 2006).

Force est de constater que ces différents résultats se contredisent. Il est donc difficile de conclure sur le lien entre le statut de l'oiseau (et plus particulièrement la corneille d'Amérique) et l'âge de l'individu. Et ceci d'autant plus que la majorité des études sur le sujet apporte une réponse qualitative à la question : l'oiseau testé est-il séropositif ou non? Mais aussi parce qu'une proportion d'individus séropositifs plus élevée dans la classe d'âge x que dans la classe d'âge y peut être interprétée de plusieurs façons :

- soit les individus de la classe d'âge x sont plus souvent exposés que ceux de la classe d'âge y (des corneilles plus jeunes pourraient être moins exposées que des corneilles plus âgées car elles ne fréquenteraient pas le même milieu);
- soit les deux classes d'âge sont également exposées mais seuls les individus de la classe d'âge x sont assez sensibles au virus pour produire des anticorps en quantité suffisante pour être détectés par le test sérologique, par rapport aux individus de la classe d'âge y (la réaction immunitaire face à un contact avec le virus du Nil serait différente en fonction de la classe d'âge de la corneille);
- soit les individus de la classe d'âge x ont une persistance des anticorps plus longue que les individus de la classe d'âge y (la réaction immunitaire suite à un contact avec le virus du Nil serait différente en fonction de la classe d'âge de la corneille);

- soit, les individus séropositifs de la classe d'âge x sont plus facilement attrapables et testables que les individus de la classe d'âge y (le comportement des corneilles varierait selon les classes d'âge);
- soit encore les individus d'âge y sont plus sensible et ont une mortalité plus élevés, et donc sont moins échantillonnés et testés que les individus d'âge x (la réaction immunitaire suite à un contact avec le virus du Nil serait différente en fonction de la classe d'âge de la corneille).

À l'heure actuelle, il est connu que les corneilles ont des comportements différents selon les classes d'âge (Caffrey 1992, Verbeek 2002), et il a été démontré pour d'autres espèces d'oiseaux que la réaction immunitaire suite à une infection par le VNO pouvait varier selon les classes d'âge (Malkinson, Banet et al. 2001; Gancz, Barker et al. 2004) donc toutes ces hypothèses semblent plausibles.

### **Sexe**

Selon une étude réalisée dans l'Illinois en 2002 sur une cohorte de corneilles vivantes, il n'existe pas de relation significative entre le sexe de la corneille et le fait que celle-ci meure du VNO au cours de l'étude (Yaremych, Warner et al. 2004).

### **Facteurs sociodémographiques**

La corneille est un oiseau au comportement social complexe. Elle a tendance à former des agrégats pour nicher le soir, pour chasser le jour, pour migrer, et elle élève ses petits au sein d'un groupe familial de 2 à 5 individus (Good 1952; Verbeek and Caffrey 2002). Ces agrégats ou groupes seront de taille variable, mais selon une étude réalisée dans l'Oklahoma en 2002 sur une cohorte de corneilles, il n'a pas été observé que la taille de ces groupes influençait la vitesse de propagation du virus au sein du groupe (Caffrey, Smith et al. 2005). En revanche l'existence même de ces agrégats favorise la propagation virale entre les individus du même groupe selon des modes de contamination orale ou par contact, selon certains auteurs (Marra, Griffing et al. 2004).

Il semblerait que les corneilles puissent développer un comportement de nourrissage des individus malades de leur groupe, ce qui, en cas d'infection par le VNO, favoriserait une fois de plus la contamination entre individus (Marra, Griffing et al. 2004).

Enfin, il semblerait aussi que les corneilles aient l'habitude de se dépouiller les plumes entre eux, ce qui, étant donnée que le virus peut se retrouver dans la peau et la pulpe des plumes, favoriserait la contamination entre individus (Verbeek and Caffrey 2002; Komar, Langevin et al. 2003; Docherty, Long et al. 2004).

### ***Études sérologiques***

Il a été observé au cours de l'étude expérimentale menée par Komar (2003) avec la souche NY99 que les espèces ne décédant pas du VNO produisaient des anticorps neutralisants suite à l'infection. Parmi ces espèces, on trouve la corneille de rivage (*Corvus ossifragus*) (Komar, Langevin et al. 2003). Selon une étude menée en 2003 et en 2004, la durée de persistance de ces anticorps neutralisants pourrait dépasser 60 semaines (soit 14 mois) chez le pigeon biset (Gibbs 2005) et 6 semaines chez le roselin (Fang and Reisen 2006).

Diverses études sérologiques menées depuis 1999 en Amérique du Nord ont montré la présence de corneilles d'Amérique séropositives vivante à l'état sauvage. Ainsi, une étude menée en Illinois en 2002 a relevé 3,2% [1,19; 7,68]\* de corneilles séropositives sur 157 testés (Ringia, Blitvich et al. 2004). Au parc zoologique du Bronx (ville de New York), 5 des 7 corneilles testées étaient positives en septembre 1999 (Ludwig, Calle et al. 2002). En Georgie, sur 230 corneilles testées en 2000-2001, 2,6% [1,06; 5,85]\* étaient positives, et ce pourcentage montait à 9,7% [2,54; 26,93]\* en 2002-2004 sur 31 corneilles testées (Gibbs, Allison et al. 2006). Enfin, dans le Minnesota, 2

---

\* Intervalle de confiance exact à 95% calculé selon Fleiss, J. L. (1981). Statistical Methods for Rates and Proportion. New York, John Wiley and Sons.

des 6 corneilles testées en 2004 étaient positives, contre 3 de 6 autres corneilles testées en 2005 (Bell, Brewer et al. 2006).

Bien sûr, ces différentes études n'ont pas la même puissance, en regard aux nombres d'individus testés. Mais elles permettent d'affirmer qu'il existe des corneilles vivantes dans la nature qui ont été exposées au virus sans que cela leur soit fatal.

### ***Impact de la maladie à l'échelle d'une population***

Étant donnée les importantes mortalités observées en Amérique du Nord suite à l'introduction du VNO chez de nombreuses espèces d'oiseaux dont les corneilles, différents chercheurs se sont penchés sur la question de l'impact de ces mortalités sur la taille des populations. Certaines études ont tentées d'utiliser les données d'observation d'oiseaux vivants réalisées par des ornithologues amateurs à travers l'Amérique du Nord. Ainsi, une étude réalisée dans la région de Chicago (USA) et utilisant des données du Project Feeder Watch (PFW) et du Christmas Bird Count (CBC) (deux séries d'observations réalisées en hiver), a mis en évidence un déclin des populations de corneilles d'Amérique, de mésanges à tête noire, et de Geais bleu au cours des années 2001-2002. Selon les auteurs, le type de déclin observé n'est pas unique dans l'histoire de ces trois espèces, et a déjà été observé au cours des décennies précédentes. La simultanéité des déclins pour les trois espèces pourrait signifier l'impact visible du VNO sur ces trois populations (Bonter and Hochachka 2003a; Bonter and Hochachka 2003b). Une autre étude de grande envergure a été menée à travers tous les États-Unis en utilisant les données du Breeding Bird Survey (BBS) (données récoltées au printemps), sur 25 années (de 1980 à 2005). Ce travail a démontré un déclin des populations de corneilles d'Amérique dès 2000 surtout dans les états du nord-est des États-Unis, pour les années 2002 et 2003 (Ladeau, Kilpatrick et al. 2007).

D'autres études basées également sur les dénombrements d'oiseaux vivants par des ornithologues amateurs ont eu moins de succès à démontrer l'impact du VNO chez les corneilles, ou les corvidés en général. Ainsi, à l'observatoire de Holiday Beach en

Ontario, le dénombrement des geais bleus de 1984 à 2004 lors de leurs vols migratoires de printemps et d'automne n'a pas montré de variation particulière depuis 2001 (date d'apparition du VNO en Ontario). Des oscillations ayant une période de deux ans sont observées dans les comptes mais aucune modification de ces oscillations n'est apparue depuis le VNO (Chartier 2005). Une autre analyse réalisée dans la région de l'état de New-York la plus touchée par l'épidémie et avec des données du Christmas Bird Count depuis 14 ans, n'a pas démontré d'impact significatif du VNO sur les populations de corneilles de cette région après 1999 (Caffrey and Petersen 2003).

D'autres études basées sur le suivie de cohorte de corneilles vivantes, ont pu démontrer l'impact du VNO sur ces oiseaux. Ainsi, en Illinois, il a été observé une mortalité directement associée au VNO d'environ 65% sur un groupe de 39 corneilles suivies au cours de l'été 2002 (Yaremych, Warner et al. 2004). Une cohorte de corneille a été suivie également en Oklahoma en 2002 et en 2003. Au cours de ces deux années, une mortalité excédentaire par rapport à la mortalité normale des corneilles a été observée. Les décès excédentaires ont tous été attribués au VNO par test diagnostique sur les carcasses. Ainsi en 2002, environ 40% de la cohorte est morte du VNO alors qu'en 2003, ce pourcentage montait à 60% (Caffrey, Weston et al. 2003; Caffrey, Smith et al. 2005). Enfin, selon des observations faites dans l'état de New York, une mortalité de 35% en 2003 a été observée sur une cohorte de 168 corneilles (Marra, Griffing et al. 2004).

Même si l'impact du VNO sur les populations de corneilles n'est pas toujours facile à mettre en évidence, notamment en utilisant des données d'observations d'ornithologues amateurs à grande échelle (comme le CBC, le PFW ou le BBS), certains suivis de cohortes nous affirment que cet impact existe et est majeur à l'échelle d'un groupe d'individus.

## ***Diagnostic de laboratoire de l'infection***

Le diagnostic de laboratoire de l'infection peut se faire sur individus vivants ou morts. Les outils diagnostiques qui nous intéressent le plus dans cette revue de littérature sont ceux disponibles et adaptés aux animaux, et aux corneilles d'Amérique en particulier. L'intérêt d'un test diagnostique est évalué, entre autre, selon les valeurs de spécificité et de sensibilité qui lui sont associées (cf Annexes – Sensibilité et Spécificité d'un test diagnostique).

### **Diagnostic sérologique**

#### *Tests disponibles*

Le 'test étalon' ou 'Gold Standard' (nomination la plus couramment utilisée) des tests sérologiques dans le cadre du diagnostic du VNO est le test de Neutralisation par Réduction de Plaque pratiqué selon le protocole standard (Dauphin and Zientara 2007). Les tests HIA (Inhibition de l'Hémagglutination) et IFA (Test d'Immunofluorescence) sont encore utilisés comme test étalon dans certains laboratoires (Dauphin and Zientara 2007).

Les tests de type ELISA (Enzyme Linked Immunosorbent Assay) ont été développés depuis quelques années. Les tests ELISA recommandés pour le diagnostic sérologique du VNO sont les tests type IgM-antibody capture ELISA (MAC-ELISA) et indirect IgG ELISA (Centers for Disease Control and Prevention 2003; Dauphin and Zientara 2007). Ces tests ont l'avantage d'être rapides, reproductibles et moins dispendieux que les méthodes classiques. Mais leurs limites résident dans le fait que les réactions croisées avec d'autres flavivirus que le VNO sont fréquentes (Beasley, Holbrook et al. 2004), et que chaque test ELISA doit être développé différemment pour chaque espèce (chaque espèce va produire ses propres types d'anticorps au contact du virus). Hors, dans le cadre du VNO, de nombreuses espèces sont infectées ce qui multiplie la quantité de tests nécessaires (Dauphin and Zientara 2007).

De récents développements dans le diagnostic sérologique du VNO mettent en œuvre des techniques d'immuno-luminescence (ex: utilisation de microsphères de polystyrènes fluorescentes) (Dauphin and Zientara 2007).

### *Comparaisons*

Une comparaison des techniques IFA et MAC-ELISA pour la détection d'anticorps IgM et IgG spécifiques au VNO a été réalisée sur des échantillons de sérums et de liquide céphalorachidien humain (Malan, Stipanovich et al. 2003). Les résultats de ces analyses démontrent que les deux techniques ont des sensibilités et spécificités équivalentes. La sensibilité et la spécificité semblent toutefois varier légèrement selon le type d'anticorps détecté : dans les cas des IgM, le test IFA semble légèrement moins sensible que le test ELISA, alors que dans le cas des IgG, la situation est inversée (Malan, Stipanovich et al. 2003).

### **Diagnostic par détection virale**

#### *Tests disponibles*

Le diagnostic par détection virale peut se faire selon une procédure d'isolement viral, ou encore une procédure de détection du virus dans les tissus. Ce deuxième type de test peut être basé sur la détection dans les tissus soit d'antigènes viraux, soit d'acides nucléiques viraux (Centers for Disease Control and Prevention 2003).

L'isolement viral reste la méthode de choix pour la détection du VNO dans des échantillons d'oiseaux, moustiques ou autres. Mais elle requière une bonne qualité d'échantillons (Dauphin and Zientara 2007).

La détection d'acides nucléiques viraux dans les tissus (exemple le plus commun : technique RT-PCR (Real Time Polymerase Chain Reaction) est une technique rapide et fiable pour la détection du virus dans une grande variété de types de tissus, mais elle reste coûteuse (Dauphin and Zientara 2007).

Les techniques de détection des antigènes viraux dans les tissus ont été développées principalement pour les programmes de surveillance en Amérique du Nord, au cours desquels il fallait détecter le virus sur un grand nombre de carcasses d'oiseaux ou dans des pools de moustiques (Dauphin and Zientara 2007). Ces techniques ont été utilisées en particulier sur des écouvillons oropharyngés ou cloacaux effectués sur des oiseaux morts. De façon globale, ces tests ne sont pas extrêmement sensibles (entre 60 et 80% selon l'espèce d'oiseau, le type de prélèvement et le type de test utilisé) mais ont une spécificité acceptable (autour de 95%) (Dauphin and Zientara 2007). Ces tests sont simples à utiliser, peu dispendieux, et rapides. Deux tests commerciaux sont disponibles : le **VecTest** (Medical Analysis Systems, Inc., Camarillo, CA, USA) et le RAMP WNV (Rapid Analyte Measurement Platform test de Response Biomedical Corp., Burnaby, British Columbia, Canada) (Dauphin and Zientara 2007).

### *Comparaisons*

Étant donné l'utilisation du VecTest dans les programmes de surveillance nationaux du VNO, de nombreuses études ont explorées la sensibilité et la spécificité de ce test diagnostique. En comparant les résultats obtenus avec le VecTest aux résultats obtenus avec une analyse RT-PCR (isolement viral comme test étalon), il a été démontré que, sur un échantillon regroupant de nombreuses espèces d'oiseaux dont la corneille d'Amérique, la sensibilité moyenne du VecTest était de 87% (n=104) contre 66% avec l'analyse RT-PCR (n=50) (Siirin, Sargent et al. 2004). En comparant les résultats obtenus avec le VecTest en prenant l'analyse RT-PCR comme test de référence chez un groupe d'oiseaux de proie (93 chouettes et 27 rapaces), la sensibilité relative du VecTest a été évaluée entre 93,5% et 95,2% sauf pour les espèces nordiques de chouettes (sensibilité inférieure à 42,9%!), et la spécificité relative a été évaluée à 100% pour les chouettes et 85,7% pour les rapaces (Gangz, Campbell et al. 2004). La sensibilité et la spécificité relatives du VecTest, toujours en prenant l'analyse RT-PCR comme test de référence, ont été évaluées chez des corneilles d'Amérique à 87% et 98% respectivement

(n=1076) (Stone, Okoniewski et al. 2004). Une étude similaire ciblant la performance du VecTest (par rapport à l'analyse RT-PCR utilisée comme référence) sur des prélèvements effectués sur des carcasses de corneilles d'Amérique a été réalisée au Manitoba et en Ontario. La sensibilité et la spécificité relatives pour l'espèce ont été mesurées à 92,8% et 79% respectivement sur des échantillons oropharyngés pour les carcasses échantillonnées en 2001 en Ontario (n=33), à 83,3% et 95,8% pour les carcasses échantillonnées en 2002 en Ontario (n=222) et à 83,9% et 93,6% pour des carcasses échantillonnées en 2002 au Manitoba (n=109). Sur des échantillons cloacaux, la sensibilité et la spécificité relatives ont été évaluées, en 2001, à 58,3% et 94,7% (n=33) en Ontario et à 83,1% et 97,9% (n=109) en 2001 au Manitoba (Lindsay, Barker et al. 2003). De ces différents travaux, on peut conclure que les valeurs de sensibilité et de spécificité pour le VecTest sont associées à différentes variables comme l'espèce d'oiseaux et le type de prélèvement.

Deux études ont comparé les tests antigéniques VecTest et RAMP (avec l'analyse RT-PCR comme référence). Pour la corneille d'Amérique, la première étude a montré une sensibilité relative de 70,4% pour le VecTest (n=524) contre 64% pour le test RAMP (n=91), ainsi qu'une spécificité relative de 98,3% (n=524) pour le VecTest contre 95% (n=91) pour le test RAMP (Padgett, Cahoon-Young et al. 2006). La seconde étude, toujours ciblée sur la corneille d'Amérique, a montré une sensibilité relative de 84,4% pour le VecTest (n=128) contre 91,4% pour le test RAMP (n=128), ainsi qu'une spécificité relative de 100% (n=198) pour le VecTest contre 98,5% (n=91) pour le test RAMP (Stone, Therrien et al. 2005).

Une étude de la sensibilité et de la spécificité relatives d'un test IFA pour la détection des antigènes du VNO dans des tissus de corneilles d'Amérique (n=100), avec l'analyse par RT-PCR utilisée comme test de référence, a montré que les résultats variaient de 96,4 à 100% pour la sensibilité et de 69% à 95,8% pour la spécificité en fonction de la nature du tissu analysé (Floral, French et al. 2007).

Une mesure de la sensibilité et de la spécificité relatives d'un test IHC (Immuno Histo Chimique) pour la détection d'antigènes du VNO sur des carcasses de corneilles d'Amérique nous apprend que, en utilisant la méthode RT-PCR comme référence, la spécificité relative de ce test est de 100%, et la sensibilité relative varie entre 72% et 100% selon que l'on utilise des anticorps mono ou polyclonaux (n=85) (Smedley, Patterson et al. 2007).

#### *Cas particulier du Vec Test appliqué à la corneille d'Amérique*

Cette section se propose de synthétiser les connaissances relatives à la spécificité et la sensibilité du VecTest pour la corneille d'Amérique, connaissances issues des articles citées dans le paragraphe précédent.

Type de prélèvement des échantillons	Sensibilité		Spécificité		n	Étude de référence
	%	IC*	%	IC*		
	Oral	84,4	[79,9; 88,1]	100		
Oral	92,8	[76,9; 98,5]	79,0	[60,8; 90,5]	33	Lindsay, 2003
Oral	83,9	[75,3; 90,0]	93,6	[86,8; 97,2]	109	Lindsay, 2003
Oral	83,3	[77,6; 87,8]	95,8	[92,0; 97,9]	222	Lindsay, 2003
Cloacal	58,3	[40,1; 74,6]	94,7	[79,4; 99,2]	33	Lindsay, 2003
Cloacal	83,1	[74,4; 89,3]	97,9	[92,5; 99,6]	109	Lindsay, 2003
Oral	70,4	[66,2; 74,2]	98,3	[96,7; 99,2]	524	Padgett, 2006
Oral	87,0	[84,8; 88,9]	98,0	[96,9; 98,7]	1076	Stone, 2004

Méthode de calcul des IC exact à 95% selon (Fleiss 1981)

Table I: Sensibilité et Spécificité relatives du VecTest appliqué à la corneille d'Amérique.

Pour toutes ces études, le test de référence utilisé a été une analyse RT-PCR sur échantillon ou tissu. L'étude de Lindsay (2003) nous donne plusieurs valeurs de sensibilités et de spécificités relatives affectées à 5 types d'échantillons (par ordre d'apparition dans le tableau) : échantillons oropharyngés prélevés en 2001 en Ontario, échantillons oropharyngés prélevés en 2002 au Manitoba; échantillons oropharyngés

prélevés en 2002 en Ontario; échantillons cloacaux prélevés en 2001 en Ontario et enfin, échantillons cloacaux prélevés en 2002 au Manitoba.

Selon les résultats de ce tableau, les tests effectués sur des prélèvements oraux semblent avoir une meilleure sensibilité et spécificité relatives que ceux effectués avec des prélèvements cloacaux, mais sans certitude étant donné la taille de l'échantillon ( $n=33$ ) (Lindsay, Barker et al. 2003). Dans le protocole de surveillance des corvidés morts en 2005 au Québec, les écouvillons ont été placés dans la bouche (à la fois dans les choanes et l'oropharynx) (Brown, Côté et al. 2005). Ceci nous laisse penser que les sensibilité et spécificité du VecTest étaient probablement équivalentes à celles calculées dans les études citées plus haut.

Les résultats présentés dans ce tableau nous donnent des valeurs assez dispersées de la sensibilité et de la spécificité relatives du VecTest employé chez la corneille d'Amérique avec un écouvillonnage type 'oral'. Quelque soit l'étude, la spécificité relative est haute (au dessus de 94,7%) sauf pour une étude où elle a été mesurée à 79% (mais avec un  $n=33$  nettement inférieur aux autres études donc ce résultat est moins fiable). En revanche, les valeurs de sensibilité relative pour des prélèvements oraux ont été mesurées entre 70,4 et 92,8%, avec des intervalles de confiance pouvant descendre jusqu'à 66,2% pour une étude ayant pourtant une bonne taille d'échantillon ( $n=524$ ) (Padgett, Cahoon-Young et al. 2006). Pour la plupart des études, la sensibilité relative se situait autour des 85%, ce qui signifie un nombre non négligeable d'individus faux-négatifs. Selon l'ensemble de ces résultats et en les comparant aux autres tests directs disponibles, leurs caractéristiques (sensibilité et spécificité), leurs coûts et leurs rapidités de résultats, le choix du VecTest semble, malgré tout, judicieux dans le cadre d'un programme de surveillance du VNO basé sur l'analyse de carcasses de corvidés dont des corneilles d'Amérique essentiellement. Il convient toutefois de garder à l'esprit que, sous certaines conditions non élucidées (certains groupes d'âge, le sexe de l'oiseau, la technique d'échantillonnage), le test semble manquer de sensibilité. Certains oiseaux seraient donc positifs mais non détectés par le système.

En conclusion, on peut rappeler les points suivants :

- Le VNO souche NY99 est un virus hautement pathogène pour la corneille d'Amérique, entraînant une mortalité expérimentale dans presque 100% des cas;
- Certains facteurs semblent être associés au risque pour la corneille d'être infectée par le VNO comme le statut sérologique vis-à-vis du virus Kunjin, l'âge, et le comportement social grégaire;
- Des études sérologiques ont démontré l'existence de corneilles séropositives pour le VNO dans la nature, qui ont donc survécu à la maladie;
- L'impact du VNO à l'échelle d'un petit groupe de corneille est dévastateur et semble l'être aussi à l'échelle d'une population;
- Les tests diagnostics disponibles pour le VNO sont nombreux et peuvent s'appliquer autant à des individus vivants que morts;
- Le choix du VecTest semble judicieux dans le cadre d'un programme de surveillance du VNO basé sur l'analyse de carcasses de corvidés.

## **Surveillance du virus du Nil occidental en Amérique du Nord**

Le virus du Nil Occidental est apparu en août 1999 dans l'état de New York. Les premiers signes visibles de l'épidémie ont été un épisode de cas humains de méningo-encéphalites rapprochés dans le temps et dans l'espace et principalement attribués à l'encéphalite de Saint-Louis (un arbovirus endémique de la côte Est des États-Unis), ainsi qu'un épisode de mortalité aviaire élevé parmi les oiseaux du parc zoologique du Bronx (Ludwig, Calle et al. 2002). Peu de temps après, un troisième épisode de morbidité/ mortalité associé à des signes neurologiques chez des chevaux de l'état de New-York a été observé (Kulasekera, Kramer et al. 2001). C'est l'effort conjugué des professionnels de la santé impliqués de près ou de loin dans ces trois premiers épisodes qui a permis d'identifier l'agent pathogène unique responsable de ces diverses épidémies, le virus du Nil occidental, alors encore inconnu en Amérique du Nord (Glaser 2004). La façon dont cette détection a eu lieu (travail transdisciplinaire) augurait bien de la façon dont allait devoir se construire le programme de surveillance pour cette maladie dans les saisons à venir.

### ***Description du système de surveillance pour le VNO en Amérique du Nord***

#### **Description générale**

Le système de surveillance pour le VNO est mixte : il comprend plusieurs composantes passives ou actives. Comme le VNO est une zoonose, une des composantes du système de surveillance consiste en une déclaration des cas humains attribuables au VNO ainsi qu'en une surveillance virologique des produits sanguins humains destinés à la transfusion (Dufour, Hendrikx et al. 2006). Le système de surveillance comprend également une composante équine qui consiste en une déclaration par les vétérinaires

des manifestations cliniques attribuables au VNO chez les Équidés, ainsi qu'une composante vectorielle qui consiste en la détection du virus dans des regroupements de vecteurs moustiques triés par espèces (Glaser 2004; Dufour, Hendrikx et al. 2006).

Une dernière composante du système de surveillance est la surveillance aviaire. Selon les auteurs, les différents volets de cette surveillance varient un peu. Dans cette revue, nous allons retenir la liste la plus exhaustive de ce volet disponible dans la littérature. Ainsi, le volet aviaire du système de surveillance global pour le VNO, comporte 3 sous-volets (Komar 2001):

- Un premier basé sur la surveillance des mortalités dans l'avifaune sauvage;
- Un second basé sur la surveillance sérologique d'oiseaux captifs;
- Un dernier basé sur des enquêtes sérologiques parmi des oiseaux sauvages en liberté.

C'est ce troisième sous-volet qui n'est pas présent systématiquement dans les autres articles traitant de la surveillance aviaire du VNO en Amérique du Nord (Glaser 2004; Dufour, Hendrikx et al. 2006).

Le second sous-volet consiste en la surveillance des séroconversions pour le VNO chez des poulets sentinelles maintenus dans des cages disposées dans des endroits stratégiques. Ce système de sentinelles a été éprouvé par le passé pour la surveillance d'autres arboviroses comme l'encéphalite Saint-Louis, l'encéphalite équine de l'Est et l'encéphalite équine de l'Ouest (Komar 2001). Il a été utilisé dès 2000 pour le VNO car une étude réalisée la même année a montré le potentiel de sentinelle des poulets lors d'infections expérimentales par le VNO (Langevin, Bunning et al. 2001). Ce potentiel se traduit par une sensibilité à l'infection uniforme dans l'espèce, une résistance à la maladie, une réponse immunitaire se développant rapidement, une zootechnie de l'espèce simple et peu coûteuse, un risque de contamination pour l'homme faible en cas de manipulation d'oiseaux ayant séroconverti, et enfin, une séroconversion ayant lieu

précocement par rapport à une épidémie visible (clinique) dans les populations avoisinantes (Komar 2001). Pourtant, il semblerait que ce système ai donné des résultats décevants dès 2001 dans le cadre du VNO en raison surtout d'une méconnaissance des endroits les plus sensibles où placer ces sentinelles (Komar 2001).

Le premier sous-volet consiste en une déclaration par le public de carcasses d'oiseaux morts trouvées dans leur environnement (Komar 2001). Rapidement, le programme s'est orienté spécifiquement sur le recensement des carcasses de corvidés, et plus particulièrement de la corneille d'Amérique (*Corvus brachyrhynchos*), du Geai bleu (*Cyanocitta cristata*), de la corneille de rivage (*Corvus ossifragus*) et du Grand Corbeau (*Corvus corax*) (Eidson 2001). Ce programme permet d'identifier les zones de circulation du virus grâce à la grande sensibilité de ces différentes espèces au VNO. En effet, la présence du VNO dans une population d'une de ces espèces de corvidés engendre une mortalité importante au sein de celle-ci. Cette mortalité est détectable grâce à l'augmentation conséquente du nombre de cadavres dans l'environnement (Komar, Langevin et al. 2003).

Une analyse a été réalisée aux États-Unis par les Centers for Disease Control and Prevention de la sensibilité de ces différents volets par rapport à la détection du VNO dans le contexte nord-américain. Il a été démontré que le volet montrant la détection la plus précoce correspondait à la mortalité des corvidés sauvages, puis venaient la séroconversion des oiseaux sentinelles, la détection du virus dans des regroupements de moustiques, et enfin l'apparition de cas vétérinaires et de cas humains (Dufour, Hendrikx et al. 2006).

Au Canada, le volet aviaire du programme de surveillance relatif à la déclaration des mortalités de corvidés sauvages, a utilisé les structures de surveillance de la Faune déjà en place avant l'arrivée du VNO, comme le Centre Canadien Coopératif pour la Santé de la Faune basé à Saskatoon (Saskatchewan – Canada) (Mörner, Obendorf et al. 2002). Aux États-Unis, l'intégration des différentes sources de données

d'origine humaine, animale, et vectorielle a pu être réalisée efficacement grâce au réseau ArboNet mis en place dès 2000 dans l'état de New York puis dans l'ensemble des États-Unis (CDC-ArboNet 2007). Au Québec, la fusion effective des différents résultats de surveillance a pu être réalisée à partir de 2003 grâce au programme intégré de surveillance pour le virus du Nil mise en place par le gouvernement de cette province (Plan d'intervention gouvernemental de protection de la santé publique contre le virus du Nil occidental ou « Integrated System for Public Health Monitoring of West Nile Virus » (ISPHM-WNV)) (Gosselin, Lebel et al. 2005).

### **Surveillance de la mortalité liée au VNO dans l'avifaune du Québec**

Même si le virus du Nil Occidental a fait son apparition en août 1999 dans l'état de New York, il n'a été détecté pour la première fois au Canada qu'en 2001, dans la province de l'Ontario, par la présence de mortalités positives pour le VNO chez des corvidés (Health\_Canada 2006).

Dès 2001, le programme de surveillance des mortalités de corvidés associées au VNO a été implanté au Québec, pour la période du 20 mai au 3 novembre. La signalisation des carcasses a été faite de la façon suivante, pour les années 2001 à 2005: les particuliers pouvaient signaler, grâce à une ligne téléphonique spécialement dédiée à cette fonction, les carcasses de corvidés présentes près de chez eux. Seules 3 espèces de corvidés étaient incluses dans le programme de surveillance québécois : la corneille d'Amérique, le gai bleu et le grand corbeau. Si l'appel téléphonique correspondait effectivement à une des ces trois espèces, un agent de la faune se déplaçait sur place et récoltait le cadavre si celui-ci était toujours présent et en relativement bon état de conservation. Ce cadavre était ensuite acheminé vers le laboratoire de pathologie du Centre Québécois pour la Santé des Animaux Sauvages, branche québécoise du Centre Canadien pour la Santé de la Faune, dans des glacières (Brown and Dallaire 2001; Brown and Dallaire 2002; Vincent, Brown et al. 2003; Vincent and Brown 2004; Brown, Côté et al. 2005). Au cours de l'année 2001, l'analyse du statut des carcasses

ainsi récoltées a constitué en un examen nécropsique complet de chaque oiseau ainsi qu'une analyse RT-PCR (Polymeras Chain Reaction) sur organes prélevés et envoyés au laboratoire fédéral de Winnipeg (Manitoba).

En 2002, le programme de surveillance des mortalités de corvidés liées au VNO au Québec a débuté le 21 mai et s'est terminé le 31 octobre. Étant donné les ressources limitées du programme de surveillance, des arrêts de récoltes ont été nécessaires dans des zones où une carcasse positive avait déjà été détectée. Les consignes, en début de saison, avaient été d'interrompre la récolte dans un rayon de 50 km autour de toute carcasse positive, mais ce rayon n'a pas toujours été respecté car jugé trop libéral par les intervenants (il a été fréquemment ramené à une valeur inférieure, entre 10 et 30 km). Les analyses des carcasses pour la détection du VNO ont été réalisées par détectons de fragments d'ADN viral présents dans les tissus des carcasses par technique RT-PCR au laboratoire national de Winnipeg (Manitoba) (Brown and Dallaire 2002; Health Canada 2006).

En 2003, le gouvernement provincial ayant été averti de la présence du VNO sur le territoire, le programme de surveillance de la mortalité des corvidés dans l'avifaune sauvage a bénéficié de plus de moyens. Cela a permis, entre autres choses, de ne pas décréter d'arrêts de récoltes dans des zones déjà positives. Le programme a débuté le 5 mai et s'est terminé le 31 octobre. Les analyses ont été réalisées pour la plupart avec un test de détection antigénique sur écouvillons cloacaux ou oropharyngés (VecTest), doublé au début de la saison par l'analyse par RT-PCR à Winnipeg sur les individus négatifs (afin de prévenir les faux-négatifs par un manque de sensibilité éventuel du VecTest) (Vincent, Brown et al. 2003). Comme la concordance entre les résultats par VecTest et par PCR était très bonne, l'analyse PCR a été abandonnée, trop coûteuse en temps, moyens et argent (Vincent, Brown et al. 2003). L'utilisation du VecTest pour la détection du VNO sur des échantillons cloacaux mais surtout oropharyngés chez des cadavres de corvidés a été validée par la suite dans d'autres régions d'Amérique du Nord comme moyennement sensible (variation de la sensibilité

mesurée lors de prélèvements oropharyngés de 70,4% à 92,8% selon les études) et très spécifique (cf Cas particulier du Vec Test appliqué à la corneille d'Amérique - p37).

En 2004, le programme de surveillance de la mortalité liée au VNO parmi les corvidés sauvages a débuté le 31 mai et s'est terminé le 2 octobre. Des arrêts de récoltes ont été décrétés dans des zones où plus de 2 corvidés positifs avaient déjà été identifiés. Le rayon de ces zones était de 6 km autour du signalement dans les zones faiblement peuplées par des hommes, et de 2,5 km dans les municipalités de 25 000 habitants et plus. Les analyses ont été réalisées en totalité avec le VecTest (Vincent and Brown 2004).

En 2005, le programme de surveillance de la mortalité liée au VNO parmi les corvidés sauvages a duré du 5 juin au 24 octobre. Des arrêts de récoltes ont été réalisés si, dans un rayon de 6 km autour de la carcasse, avaient déjà été récoltés 2 corvidés positifs ou plus dans les 21 jours précédents le signalement. Ce rayon a été diminué à 2,5 km dans les municipalités de 25 000 habitants et plus. Les analyses ont été réalisées avec le VecTest (Brown, Côté et al. 2005).

A partir de 2006, le programme de surveillance de la mortalité aviaire liée au VNO a été abandonné par le gouvernement du Québec, conformément aux recommandations des experts provinciaux (MSSS\_Québec 2006). Cette décision a été adoptée pour des raisons coût/bénéfice du système de surveillance.

### ***Faits soutenant la composante 'mortalité avifaune' du système de surveillance***

Si l'on s'intéresse aux différentes qualités nécessaires à un 'bon' système de surveillance (Dufour, Hendrikx et al. 2006), on peut constater que plusieurs d'entre elles se retrouvent dans le système de surveillance de la mortalité lié au VNO parmi les corvidés sauvages en Amérique du Nord en général et au Québec en particulier.

### **Sensibilité du système de surveillance**

Pour une maladie donnée, la sensibilité d'un réseau de surveillance est positivement corrélée à la valeur prédictive négative du système qui correspond à la probabilité que la région surveillée soit effectivement indemne de maladie, lorsque le système de surveillance ne détecte aucun cas (Dufour, Hendrikx et al. 2006).

Le système de surveillance des mortalités liée au VNO dans l'avifaune au Québec était basé sur les espèces de la famille des corvidés les plus sensibles au VNO (soit la corneille d'Amérique, le grand corbeau, et le geai bleu) selon des infections expérimentales par la souche NY99 du VNO réalisées en 2001 (Komar, Langevin et al. 2003). Le taux de mortalité post-infection pour ces espèces est très élevé, proche de 100%. De plus, les tests qui ont été utilisés par le passé (RT-PCR) et qui sont utilisés actuellement (VecTest) pour la détection du virus chez les carcasses de corvidés ont des sensibilités et des spécificités assez élevées. Le test RT-PCR est un test qui possède une sensibilité et une spécificité proche de 100% (Dauphin and Zientara 2007). Alors que le VecTest, utilisé avec la corneille d'Amérique a une sensibilité relative moyenne et une très bonne spécificité relative (Table I). Donc la probabilité qu'une carcasse réellement positive pour le VNO soit détecté positive lors des analyses est très élevée, proche de 1 avec l'analyse RT-PCR et autour de 0,8 avec le VecTest (sensibilité du Vec Test).

<b>Prévalence estimée<sup>(1)</sup></b>	<b>Sensibilité<sup>(2)</sup></b> P(T+/M+)	<b>VPP<sup>(3)</sup></b> P(M+/T+)	<b>Spécificité<sup>(2)</sup></b> P(T-/M-)	<b>VPN<sup>(4)</sup></b> P(M-/T-)	<b>Référence de l'étude</b>
Inconnue <sup>(5)</sup>	70,4%	[95,5%; 98,7%]	98,3%	[64,1%; 83,3%]	Padgett, 2006
Inconnue <sup>(5)</sup>	92,8%	[74,6%; 89,1%]	79%	[85,5%; 94,3%]	Lindsay, 2003
56,9%	83,9%	94,5%	93,6%	81,5%	Lindsay, 2003
Inconnue <sup>(5)</sup>	83,3%	[92,9%; 97,3%]	95,8%	[75,5%; 89,6%]	Lindsay, 2003
39,3%	84,4%	100%	100%	90,1%	Stone, 2005
65,2%	87%	98,8%	98%	80,1%	Stone, 2004

<sup>(1)</sup> Prévalence estimée selon les résultats des tests RT-PCR réalisés sur échantillons de tissus (cerveau, rein) ou sur les écouvillons.

<sup>(2)</sup> Valeurs relatives de la sensibilité et de la spécificité calculées en utilisant une analyse RT-PCR comme référence.

<sup>(3)</sup> Valeur Prédictive Positive

<sup>(4)</sup> Valeur Prédictive Négative

NB : les VPP et VPN sont calculés avec les prévalences estimées (Dohoo, Martin et al. 2003). Selon Padgett (2006), les résultats des analyses RT-PCR réalisées sur tissus et sur écouvillons semblent très similaires (94% de concordance).

(5) Lorsqu'aucune prévalence n'était donnée pour l'échantillon, un intervalle de confiance de VPP et de VPN a été calculé pour une prévalence allant de 40 à 65% (valeur minimale et maximale des prévalences mesurées connues).

Table II : Caractéristiques du VecTest appliqué à la corneille d'Amérique sur des échantillons de tissus (cerveau, rein) ou sur des écouvillons oropharyngés.

Dans le contexte nord-américain où la prévalence du VNO dans les populations de corneilles échantillonnées varie entre 40 et 65% (Table II), les VPP et VPN sont hautes, ce qui signifie, pour la VPP, qu'un oiseau testé positif avec le Vec Test a entre 74,6% et 100% de chance d'être effectivement atteint du VNO et, pour la VPN, un oiseau testé négatif a entre 64,1% et 94,3% de chance d'être réellement indemne du VNO (les valeurs basses de la VPN sont associées à une sensibilité moyenne du VecTest).

Ces éléments mis bout à bout indiquent que le système de surveillance semble suffisamment sensible pour la détection de la circulation virale dans les populations d'oiseaux sauvages, lorsqu'une carcasse est analysée, même si un certain nombre de faux négatifs subsiste en utilisant le VecTest uniquement.

De nombreuses études sont apparues dans la littérature dès 2001, démontrant le rôle de sentinelle précoce que constituaient les corvidés en général et la corneille d'Amérique en particulier, pour la détection de périodes ou de zones à risque pour l'humain. Certaines études travaillant avec des données spatiales agrégées sur un état, ont mis en évidence la succession chronologique systématique du début des cas de mortalités liées au VNO ou non parmi les corneilles et parmi les humains. Le délai entre les deux variait de 3 mois à 2 semaines (Eidson, Kramer et al. 2001; Marfin, Petersen et al. 2001; Watson, Jones et al. 2004). D'autres études sont parues, travaillant toujours sur la même problématique de l'association entre les corvidés morts (positifs ou non), et le risque pour la santé humaine, mais à des échelles spatiales plus fines. Toutes concluaient à une association entre les deux phénomènes. Selon les études, on a mis en évidence une

association entre le nombre de carcasses de corvidés (peu importe le statut) et le nombre de cas humains (Eidson, Miller et al. 2001; Julian, Eidson et al. 2002; Theophilides, Ahearn et al. 2003; Johnson, Eidson et al. 2006) et/ou une association entre le nombre de carcasses de corvidés positives par rapport au nombre de carcasses totales et les cas humains (Julian, Eidson et al. 2002; Reisen, Barker et al. 2006; Beroll, Berke et al. 2007). Toutes ces démonstrations indiquent qu'un système de surveillance sensible pour la détection de la circulation du VNO dans les populations de corvidés le serait donc aussi, par association, pour la détection d'une augmentation du risque associé au VNO pour la population humaine.

Le Center for Disease Control and Prevention (CDC) aux États-Unis a comparé la sensibilité respective des différentes composantes du système de surveillance global pour le VNO en Amérique du Nord, pour conclure que la composante relative à la surveillance des mortalités liées au VNO dans les populations de corvidés était la plus sensible de tout le système (Dufour, Hendriks et al. 2006). Cela semble vrai tant qu'il y a des individus pour détecter des carcasses de corvidés morts, ce qui est souvent lié à l'écoumène humain. Dans des zones peu peuplées, comme le Nord du Québec, cette composante du système de détection du VNO est totalement inefficace.

### **Spécificité**

Pour une maladie donnée, la spécificité de la surveillance consiste à ne détecter que les cas de cette maladie, afin de limiter au maximum les fausses alertes (Dufour, Hendriks et al. 2006).

On peut considérer que le système de surveillance pour le VNO des mortalités de corvidés est spécifique car il se préoccupe de l'état de circulation du virus dans l'avifaune sauvage qui est considérée comme être le réservoir viral (Kramer and Bernard 2001; Van Der Meulen, Pensaert et al. 2005). Il ne se disperse pas à travers la surveillance d'autres espèces, hôtes accidentels du virus, parmi lesquels la détection de

cas positifs ne seraient pas forcément associées à une augmentation du risque pour l'espèce humaine.

### **Simplicité du système**

Un système de surveillance simple est un système de surveillance dont les circuits de récolte, de centralisation des données et de diffusion de l'information sont les plus courts et directs possibles (Dufour, Hendrikx et al. 2006).

Il est difficile de juger de la simplicité d'un système de surveillance sans y avoir participé activement. Toutefois, les comptes rendus des activités de surveillance de 2001 à 2005 démontrent que, après environ 2 années de rodage, le système fonctionnait très bien (Brown and Dallaire 2001; Brown and Dallaire 2002; Vincent, Brown et al. 2003; Vincent and Brown 2004; Brown, Côté et al. 2005).

Le fait que le système de surveillance soit basé sur l'appel volontaire de particuliers pour signaler des carcasses de corvidés donne une simplicité au système : pas besoin d'aller chercher l'information par des méthodes d'échantillonnage complexe de l'avifaune (l'échantillonnage de population d'animaux sauvages est toujours complexe) (Mörner, Obendorf et al. 2002).

### **Adaptabilité du système**

L'adaptabilité d'un système correspond à sa capacité à continuer d'être efficace dans une situation qui ne correspond pas exactement à ce qui a été prévu et organisé.

Un bon exemple de l'adaptabilité du système de surveillance des mortalités des corvidés pour le VNO est le fait qu'il ait pu être appliqué à l'échelle du continent Nord-Américain toute entière, avec des résultats appréciables quelque soit la localisation. Ainsi, en Californie, les corvidés ont constitué une sentinelle précoce de l'augmentation du risque pour la population humaine (Reisen, Barker et al. 2006), comme cela a été le cas en Illinois (Watson, Jones et al. 2004), en Ontario (Beroll, Berke et al. 2007) et bien sur dans l'état de New-York (Julian, Eidson et al. 2002).

## **Rapport Coût/ Efficacité**

Le Rapport coût/efficacité du système de surveillance correspond à la relation entre la sensibilité du réseau et son coût. Le coût conditionne bien souvent la durabilité du système de surveillance (Dufour, Hendrikx et al. 2006).

Un élément clé de ce système de surveillance est la récolte des données grâce à des appels volontaires des particuliers, sur une ligne téléphonique sans frais. L'effort financier à mettre dans un protocole d'échantillonnage est donc réduit au minimum (coût de la ligne téléphonique, des standardistes et des agents de la faune se déplaçant pour récolter les carcasses) (Eidson 2001). Au Québec, la ligne téléphonique qui a servi à récolter les appels était un numéro déjà en place avant le début de la surveillance VNO en 2001 et 2002 (SOS Braconnage) puis s'est converti à partir de 2003 en un numéro spécialement dédié à la surveillance VNO grâce à la collaboration du Ministère des Communications (Brown and Dallaire 2001; Brown and Dallaire 2002; Vincent, Brown et al. 2003).

Au Québec, et au Canada en général, l'analyse des carcasses récoltées a été réalisée dans des laboratoires diagnostiques déjà existants. En effet, c'est le Centre Canadien Coopératif sur la Santé de la Faune (Canadian Cooperative Wildlife Health Center) qui a reçu le mandat du volet surveillance de la mortalité liée au VNO dans les populations de corvidés sauvages (Mörner, Obendorf et al. 2002; CCWHC-CCCSF 2007). La ramification québécoise du CCCSF est le CQSAS (Centre Québécois pour la Santé des Animaux Sauvages), qui, de 2001 à 2005, a assuré la nécropsie et l'analyse des carcasses ainsi que la saisie des résultats relatifs à ce volet de la surveillance VNO (Brown and Dallaire 2001; Brown and Dallaire 2002; Vincent, Brown et al. 2003; Vincent and Brown 2004; Brown, Côté et al. 2005).

Enfin, la réalisation à partir de 2003 du diagnostic du statut des carcasses avec le VecTest à Saint Hyacinthe (au CQSAS) plutôt que par analyse d'échantillons d'ADN à Winnipeg (Vincent, Brown et al. 2003) a engendré une diminution des coûts d'analyse

importante (diminution des frais liés au test diagnostic utilisé et au transport des échantillons).

### ***Limites de la composante 'mortalité aviaire' de ce système de surveillance***

Plusieurs éléments intrinsèques au système sont susceptibles d'influencer sur son efficacité et sa sensibilité et ceci pour les raisons qui suivent.

#### **Éléments liés à la biologie des corvidés**

L'inconvénient du système de surveillance tel qu'il est décrit est qu'il ne tient pas compte des densités de populations de corneilles sur le territoire. L'indicatif que l'on utilise est l'augmentation du nombre de cadavres en général ou du nombre de cadavres positifs par rapport au nombre de cadavres total, mais aucun de ces nombres ne correspond à un risque tel que définit en épidémiologie (nombre de cas/ population exposée) (Komar 2001). Dès que l'on veut incorporer une espèce de la faune sauvage à un système de surveillance, il est indispensable de se poser les questions relatives à la biologie de cette espèce, et d'avoir une idée des densités d'animaux vivants présents sur le territoire surveillé, afin d'éviter les erreurs d'interprétation des résultats obtenus : un corvidé mort sur 100 ne correspond certainement pas au même risque pour la santé humaine que un corvidé mort sur 10 (Mörner, Obendorf et al. 2002).

La sensibilité pour le VNO des trois espèces de corvidés retenues dans le système de surveillance en Amérique du Nord a été très élevée durant au moins les 4 premières années de circulation du VNO (de 1999 à 2004) (Komar, Langevin et al. 2003). Mais il est possible que celle-ci se soit amoindrit ou s'amoindrissent avec le temps car les oiseaux les moins sensibles sont sélectionnés génétiquement dans leur population et se reproduisent contrairement aux autres, qui sont morts (Komar 2001). Dans ce cas, à intensité de circulation du VNO égale au sein d'une population de corvidés, on observera de moins en moins de mortalités.

Enfin, le VNO s'étend à des territoires d'Amérique du Nord au sein desquels perdurent de façon endémique ou épidémique d'autres arbovirus, comme l'encéphalite de Saint-Louis. Il est possible que la présence d'anticorps pour ces autres arboviroses chez certains individus représente une protection croisée en cas d'infection par le VNO, comme cela a été démontré chez le Hamster (Komar 2001; Brault, Langevin et al. 2004). Dans ce cas et dans ces zones la mortalité liée au VNO serait moins intense, même avec une circulation du VNO importante, et donc le système de surveillance serait moins sensible.

#### **Éléments liés au statut mort des oiseaux récoltés**

Une étude réalisée en Georgie (États-Unis) en 2003 a démontré que la persistance de carcasses de type corvidés était de 1,6 jours en moyenne dans un environnement rural et de 2,1 jours en moyenne dans un environnement urbain. La disparition des carcasses était le fait d'animaux charognards, comme les rats laveurs, les coyotes, les chiens, les chats, ou encore les renards (Ward, Stallknecht et al. 2006). Au cours de la saison de surveillance 2003 au Québec, il a été calculé que le délai moyen entre la découverte de la carcasse et la collecte de celle-ci a été de 0,7 jour en moyenne (Vincent, Brown et al. 2003). Pour ces raisons, les mortalités effectivement détectées par le système de surveillance ne correspondent qu'à une proportion restreinte des mortalités effectives dans la population de corvidés.

#### **Éléments liés au virus**

Il est probable que la souche NY99 évolue génétiquement vers une souche moins pathogène pour son hôte (Komar 2001), ce qui rendrait le système de surveillance moins efficace en diminuant le risque de mourir chez un corvidé infecté. Une étude a démontré en 2003 des modifications génétiques chez certaines souches de VNO-NY99 de 0,35% en moyenne par rapport au matériel génétique original récolté à New-York en 1999 (Davis, Beasley et al. 2003). Une autre étude a montré la divergence des gènes structuraux du virus de Nil de 0,18% entre la souche 1999 et une souche trouvée en 2002

chez l'homme, et de 0,37% entre la même souche 1999 et une souche présente chez l'homme en 2005 (Grinev, Daniel et al. 2008).

### **Éléments liés à la population humaine**

Le signalement de carcasses étant basé sur le volontariat, il est évident que la localisation de ces carcasses sera fortement associée à l'écoumène humain (Eidson 2001; Childs, Krebs et al. 2007). Donc, même à l'heure actuelle, l'estimation réelle du risque d'infection par le VNO pour les populations humaines en zone rurale est biaisée (beaucoup moins précise) par rapport aux zones urbaines car la densité de population humaine y est moindre. Selon une étude réalisée en Georgie, il a été démontré que des carcasses disposées en milieu urbain avaient 2 à 3 fois plus de chance de se faire détecter par un particulier qu'en milieu rural (Ward, Stallknecht et al. 2006).

Enfin, s'il est évident que l'engouement pour la population a été très fort au début du programme de surveillance, l'intérêt du public se perd progressivement, comme pour tout phénomène qui ne correspond plus à 'la' nouveauté de l'instant (Komar 2001; Kilpatrick, Ladeau et al. 2007). Ainsi, au Québec, l'année 2003 a correspondu au maximum de signalements de carcasses (7031 en tout) (Vincent, Brown et al. 2003). Ce nombre a décliné en 2004 (2277 signalements) (Vincent and Brown 2004) et en 2005 (1600 signalements) (Brown, Côté et al. 2005). En diminuant le nombre de signalements, on perd de la sensibilité dans le système de surveillance et de la précision dans l'estimation du risque pour la santé humaine.

### ***Description des résultats de surveillance obtenus au Québec entre 2001 et 2005***

#### **Bilan de la surveillance des mortalités de corvidés**

En 2001, aucun cas de corvidés mort du VNO n'a été détecté par le Centre Québécois pour la Santé des Animaux Sauvages, attentifs depuis 1999 à l'arrivée

potentiel de ce virus en sol québécois. Entre le 20 mai et le 3 novembre, parmi les carcasses signalées, 655 ont été analysées, dont 538 corvidés et 117 non-corvidés. Les analyses ont été effectuées par RT-PCR sur des échantillons de tissus prélevés sur les carcasses (Brown and Dallaire 2001).

En 2002, entre le 21 mai et le 31 octobre, parmi les carcasses signalées, 762 ont été analysées, toujours par RT-PCR. Sur les 762 carcasses analysées, 610 étaient négatives, et 139 positives, dont 123 corvidés et 16 oiseaux de proie. Les premières carcasses positives ont été diagnostiquées au cours de la dernière semaine de juin, avec un maximum de carcasses positives à la mi-août. Les régions les plus touchées (par ordre d'importance décroissante) ont été : Montérégie, Montréal, Laval, Chaudière-Appalaches et Mauricie (Brown and Dallaire 2002).

En 2003, entre le 5 mai et le 31 octobre, parmi les carcasses signalées, 2571 ont été analysées : 1788 corneilles d'Amérique, 709 geais bleus et 73 grands corbeaux. Les analyses (VectTest et/ou PCR) ont détectées 846 corvidés positifs en tout dont 638 corneilles, 202 geais bleus et 6 grands corbeaux. Les premières carcasses positives ont été diagnostiquées au cours de la deuxième semaine de juillet. Le maximum de carcasses positives a été atteint au cours de la dernière semaine d'août. Les régions du Québec les plus touchées ont été (par ordre d'importance décroissante) la région de Laval, Montérégie, Montréal-Centre, Outaouais, Mauricie et Centre du Québec, Lanaudière et Laurentides. Parmi les carcasses dont il a été possible de déterminer l'âge, on a remarqué que seulement 3,4% des carcasses des Juvéniles (jeunes de l'année) (n=446) étaient positives contre 21,3% chez les adultes (n=1454) (Vincent, Brown et al. 2003).

En 2004, entre le 31 mai et le 2 octobre, parmi les carcasses signalées, 366 ont été analysées. Les analyses ont été effectuées par VecTest majoritairement; 122 carcasses ont été détectées positives dont 95 corneilles. Les premières carcasses positives ont été diagnostiquées au cours de la première semaine de juin, avec un maximum de cas durant la dernière semaine d'août. Les régions les plus touchées ont été

(par ordre d'importance décroissante) : Montréal-Centre, Montérégie, Outaouais, Laval, Lanaudière, Laurentides et Estrie. Parmi les carcasses dont il a été possible de déterminer l'âge, on a remarqué que seulement 0,81% des carcasses des Juvéniles (jeunes de l'année) étaient positives (n=123) contre 12,9% chez les adultes (n=651) (Vincent and Brown 2004).

En 2005, entre le 5 juin et le 24 octobre, parmi les carcasses signalées, 532 ont été analysées à l'aide du VecTest essentiellement. Sur les 532 carcasses, 115 étaient positives dont 77 corneilles. Les premières carcasses positives ont été diagnostiquées au cours de la 2<sup>ème</sup> semaine de juillet, avec un maximum de carcasses positives entre la deuxième semaine d'août et la première de septembre. Les régions les plus touchées ont été (par ordre d'importance décroissante) : Laval, Lanaudière, Laurentides, Montréal, Montérégie et enfin Outaouais (Brown, Côté et al. 2005). Un protocole de détermination de l'âge selon trois classes a été mis en place au début de la saison de surveillance afin d'explorer les raisons des prévalences différentes parmi les carcasses de corneilles en fonction de leur âge. Les résultats spécifiques de ce protocole sont donnés dans les articles 1 et 2 de cette thèse. Les données qui y sont analysées correspondent aux données de surveillance du 5 juin au 15 septembre (sous-échantillon des données complètes, pour des raisons purement organisationnelles).

### **Bilan de la surveillance des cas humains**

Le VNO a fait son apparition au Québec en 2002. Il a été à l'origine de 20 cas cette année là, dont 3 décès, dans la région de Montréal-Centre. La majorité des cas (12/20) étaient eux aussi originaires de la région Montréal-Centre (MSSS\_Québec 2006).

En 2003, 17 cas humains ont été détectés, dont 6 dans la région de Montréal-Centre, 6 dans la région de la Montérégie, et 3 dans la région de Laval. Aucun de ces cas n'a conduit au décès de la personne (MSSS\_Québec 2006).

En 2004, 3 cas humains ont été détectés, dont un cas qui aurait été infecté à l'extérieur de la province et qui est décédé des suites de la maladie dans la région de Québec (MSSS\_Québec 2006).

En 2005, 5 cas humains ont été détectés en tout, dont 3 cas dans les Laurentides (parmi ces 3 cas, un décès a eu lieu) (MSSS\_Québec 2006).

En 2006, un seul humain a été détecté séropositif dans les prélèvements de sang analysés par HémaQuébec. Cet individu était domicilié dans la région de Lanaudière (MSSS\_Québec 2008).

En 2007, un seul cas humain a été détecté séropositif. C'est individu était domicilié en Montérégie et est suspecté d'avoir été infecté par le VNO à l'extérieur de la province (MSSS\_Québec 2008).

En 2008, un seul cas humain a été détecté séropositif au Québec, à date du 20 septembre (MSSS\_Québec 2008).

En conclusion, on peut rappeler les points clés suivants à propos du système de surveillance des mortalités des corvidés liées au VNO en Amérique du Nord :

- La composante mortalité des corvidés n'est qu'une des composantes du système de surveillance général comprenant aussi les humains, les moustiques et les chevaux;
- Au Québec, cette composante a été active de 2001 à 2005;
- Les points forts soutenant cette composante de surveillance sont une relativement bonne sensibilité à l'augmentation du risque d'infection par le VNO dans les populations humaines, ainsi qu'un système de récolte des données simple, passif, et utilisant des structures diagnostiques déjà existantes;
- Les points faibles de cette composante sont l'évolution future de la sensibilité du système qui pourrait être fortement compromise suite notamment à l'adaptation des populations de corvidés à ce virus, à la perte d'intérêt des populations humaines pour signaler les carcasses;
- Le VNO a été actif au Québec de 2002 à 2005, date de la fin du programme de surveillance de mortalité aviaire. Entre 2003 et 2005, les cas humains et de mortalité aviaire liés au VNO n'ont cessé de diminuer.

## **Modèles de propagation du VNO au sein des populations d'oiseaux**

Étant donné les outils de modélisation existant à ce jour et qui ont été appliqués à la problématique du VNO, avec plus ou moins de succès, nous avons choisi de concentrer notre attention essentiellement sur les modèles de type dynamique.

### ***Modèles dynamiques de transmission***

Tous les modèles de dynamique de la propagation du VNO dont la description va suivre sont basés sur le classique modèle d'Anderson et May de la propagation de la Malaria, selon un système d'équation différentielle entre trois compartiments : sensibles, infectés et guéris/immunisés (Anderson and May 1991).

Il existe dans la littérature à ce jour 6 modèles dérivés du modèle d'Anderson et May pour décrire la dynamique de propagation du VNO dans les populations de vecteurs, de réservoirs, et éventuellement d'hôtes accidentels comme l'homme. Nous allons procéder à la description des assomptions qui sous-tendent chacun de ces 6 modèles ainsi que des principaux résultats qu'ils ont permis d'obtenir.

#### ***Modèle de Lord (Lord and Day 2001a; Lord and Day 2001b)***

- Description

Ce modèle met en interaction une population de vecteurs Moustiques et d'hôtes Oiseaux Sauvages. Le modèle utilise une distribution stochastique pour la plupart des paramètres.

Le vecteur moustique peut prendre 3 états différents : Sensible (S) – Latent (L) – Infecté (I). Le recrutement dans l'état Sensible se fait grâce à une fonction du temps qui décrit une densité de vecteur basale à laquelle s'ajoutent deux pics de plus fortes densités au printemps et en été. Il n'existe pas de transmission verticale du virus entre

les femelles infectées et les œufs pondus. La contamination virale qui fait passer les individus de l'état S à l'état L se fait par piqûre d'un oiseau sauvage infecté. Le passage de l'état L à l'état I est fonction de la vitesse de développement du virus chez le moustique.

La population d'hôtes oiseaux sauvages a été structurée en 2 classes d'âge : Juvéniles (Juv) et Adultes (Ad). Les oiseaux passent entre 5 et 30 jours dans le compartiment Juv qui correspond à un état de forte vulnérabilité au virus. Le recrutement dans la classe d'âge Juv est une fonction du temps et est calculé selon un taux de reproduction de base à l'année longue auquel s'ajoute un pic de reproduction au printemps. Les individus Juv Sensible (S) peuvent devenir Infectés (I) en cas de piqûre par un moustique infecté. Le recrutement pour le compartiment Ad se fait suite à la maturation des Juv. Le compartiment Ad est divisé en deux états S et I, similaires aux états S et I du compartiment Juv. La probabilité d'infection chez les Juv est plus élevée que chez les Ad, reflétant ainsi la plus grande vulnérabilité à l'infection chez les Juv que chez les Ad. Un taux de mortalité lié à l'infection par le VNO est appliqué aux deux états I des compartiments Juv et Ad. Les individus infectés Juv et Ad non décédés suite à l'infection par le VNO accèdent à un compartiment R (Recovery = Guéris). Le modèle ne tient pas compte de la contamination horizontale entre deux individus hôtes.

- Principaux résultats

L'analyse de sensibilité et les simulations sur une saison issues de ce modèle ont permis aux auteurs de conclure à la nécessité d'une densité de moustiques forte lors de l'apparition d'une épidémie de VNO. Le fait que les hôtes oiseaux sauvages puissent mourir de l'infection par le VNO diminue la capacité de transmission du virus au sein des populations d'oiseaux et peut donc empêcher le développement d'une épidémie ou diminuer la taille de celle-ci. La date d'introduction du virus dans les populations influe sur la date de l'épidémie en résultant. Le pic infectieux dans les populations d'oiseaux vivants (prévalence du VNO) intervient après le pic infectieux dans les populations de

moustiques. Toutefois il a aussi été observé au cours des simulations qu'en cas d'épidémie, l'augmentation du nombre d'oiseaux morts par le virus se ferait de façon encore plus précoce que l'augmentation de la prévalence du virus dans les populations de moustiques.

#### *Modèle de Bowman (Bowman 2005)*

- Description

Ce modèle met en interaction une population de vecteurs Moustiques (M), d'hôtes réservoirs Oiseaux (B) et d'hôtes accidentels Hommes (H). C'est un modèle déterministe.

La population de vecteur (M) se répartit en deux états : Sensible (S) et Infecté (I). Le recrutement dans le compartiment S est assuré à taux constant et traduit les naissances, ou l'immigration dans la population. Le passage de l'état S à I se fait suite à un repas sanguin pris sur un oiseau infecté. La transmission verticale du virus des femelles infectées aux œufs n'est pas considérée dans le modèle.

La population de réservoir (B) se répartit elle aussi en deux états : Sensible (S) et Infecté (I). Le recrutement dans le compartiment S se fait selon un taux constant représentatif des naissances et des immigrations. Un taux de mortalité lié au VNO est appliqué au compartiment I. Le recrutement pour le compartiment I se fait suite à une piqûre d'un oiseau S par un moustique infecté. La transmission horizontale entre individus n'est pas considérée dans le modèle.

La population d'hôtes accidentels (H) se répartit selon 5 états successifs: sensible (S), infecté asymptomatique ou incubant (E), infecté symptomatique (I), hospitalisé (H) et guéris (R). Le recrutement dans le compartiment S se fait à taux constant et est représentatif des naissances et de l'immigration dans les populations humaines. Un taux de mortalité constant lié au virus est appliqué uniquement à l'état H. Le recrutement dans le compartiment E se fait suite à une piqûre par un moustique infecté. Le

recrutement dans le compartiment I se fait à un taux constant représentant la proportion d'individus infectés développant des symptômes, après un délai de 2 à 14 jours d'incubation de la maladie. Le recrutement dans le compartiment H se fait à taux constant proportionnel à la quantité d'individus dans le compartiment I, qui représente le pourcentage d'individus aux symptômes assez graves pour nécessiter une hospitalisation. Enfin, le recrutement pour le compartiment R est fait selon un taux constant proportionnel au nombre d'individus hospitalisés, et qui représente le pourcentage de personnes hospitalisé à cause d'une infection par le VNO se rétablissant. Le passage des compartiments E et I au compartiment R directement est impossible.

- Principaux résultats

Les objectifs de ce modèle étaient d'évaluer l'impact d'un traitement larvicide versus adulticide sur la dynamique virale, l'impact de la protection personnelle chez les populations humaines sur cette même dynamique et de comparer l'efficacité d'un traitement adulticide chez les moustiques vecteurs versus la protection personnelle chez les populations humaines.

Le traitement larvicide a été simulé en diminuant le taux de recrutement dans le compartiment S de la population de vecteur, alors que le traitement adulticide a été simulé en augmentant le taux de mortalité naturel chez les vecteurs. Les deux phénomènes ont eu pour conséquence la diminution de  $R_0$ , nombre de cas secondaire engendré par un moustique infecté, sans que les auteurs ne concluent sur le type de traitement le plus efficace des deux.

L'effet de la protection personnel (exemple : port d'un vêtement à manches longues) a été simulé en diminuant la probabilité qu'un individu piqué par un moustique infecté ne soit infecté à son tour et donc passe dans le compartiment E (infecté asymptomatique). Les auteurs ont conclu que la protection personnelle était à même de diminuer efficacement le nombre de cas humains liés au VNO.

Une comparaison du traitement adulticide à la protection personnelle a amené les auteurs à conclure que ce premier était le plus efficace pour diminuer le nombre de cas humains.

*Modèle de Wonham (Wonham, de-Camino-Beck et al. 2004)*

- Description

Ce modèle met en interaction une population de vecteurs moustiques et d'hôtes réservoirs oiseaux. Les paramètres du modèle ont une distribution stochastique.

La population de vecteurs moustiques  $M$  est représentée par 4 états successifs : larvaire ( $L$ ), sensible ( $S$ ), exposé ( $E$ ) et infecté ( $I$ ). Le recrutement dans le premier compartiment  $L$  se fait à taux constant proportionnellement à la quantité d'individus présents dans les stades  $S$ ,  $E$  et  $I$ , et qui sont des femelles capables de se reproduire. Le temps passé dans le compartiment  $L$  est de 15 jours et correspond à la durée du développement du moustique de l'œuf au stade adulte. Le recrutement dans le compartiment  $S$  se fait proportionnellement à la quantité de larves  $L$ . Le recrutement dans le compartiment  $E$  se fait par piqûre d'un oiseau infecté par un moustique, et est donc proportionnel à la quantité de moustiques  $S$  et d'oiseaux infectés. Le recrutement dans le compartiment  $I$  se fait à un taux constant proportionnel à la quantité de moustiques  $E$ . Le temps passé dans le stade  $E$  est de 8 à 12 jours et correspond à la période d'incubation de la maladie chez le moustique. Aucune transmission verticale du VNO entre femelle infectée et œufs n'est considérée.

La population d'hôtes réservoirs oiseaux est représentée par 4 stades non successifs : sensible ( $S$ ), infecté ( $I$ ), mort ( $D$ ) et guéris ( $R$ ). Le recrutement dans le compartiment  $S$  est nul : la simulation débute avec un nombre fixe  $N_{B0}$  d'oiseaux qui n'est pas renouvelé au cours du temps par naissance ou immigration. Le recrutement dans le compartiment  $I$  provient des oiseaux infectés par piqûre d'un moustique infecté : il est donc proportionnel au nombre d'oiseaux initial  $N_{B0}$  ainsi qu'au nombre de moustiques  $I$ . Une fois les oiseaux infectés, ils peuvent soit mourir de l'infection

(compartiment D), soit guérir (compartiment R). Le taux de recrutement dans chacun de ces deux compartiments est donc proportionnel au nombre d'oiseaux I ainsi qu'au taux de mortalité associé à une infection par le VNO pour le compartiment D, ou au taux de guérison suite à une infection par le VNO pour le compartiment R. La transmission horizontale du virus entre individus n'est pas prise en compte.

- Principaux résultats

Les objectifs du modèle sont de déterminer les valeurs seuil des différents paramètres du modèle susceptibles d'engendrer une épidémie.

Les simulations ont eu lieu sur une seule saison. Les principales conclusions auxquelles les auteurs ont abouti sont les suivantes :

- Il existe un seuil  $sm^*$  du ratio entre moustiques infectés et moustiques non-infectés en dessous duquel il ne peut y avoir d'épidémie de VNO ( $R_0$ , nombre de cas humains secondaires à un cas humain, inférieur à 1);
- Plus le nombre initial de moustiques infectés  $sm^*$  est élevé, plus le pourcentage de mortalité lié au VNO dans la population d'oiseaux sera élevé aussi, s'il y a épidémie;
- Ce seuil  $sm^*$ , au-delà duquel il y a épidémie de VNO, est proportionnel au taux de mortalité et au taux de guérison lié au VNO chez les oiseaux. Quand le taux de mortalité diminue, le seuil diminue, et quand le taux de mortalité augmente, le seuil augmente;
- Les simulations ont montré que la quantité d'oiseaux morts du VNO lors d'une épidémie augmentait plus rapidement que la quantité d'oiseaux infectieux ou de moustiques infectieux;
- Une petite augmentation de la mortalité des moustiques adultes (qui pourrait être lié à un traitement aduicticide par exemple) engendre une

grande augmentation du seuil  $sm^*$ , et donc une diminution du risque d'avoir une épidémie;

- Une diminution de la quantité d'oiseaux sensible engendrerait une augmentation de  $R_0$ , car cela augmenterait la quantité de piqûres pour un même oiseau.

*Modèle de Cruz-Pacheco (Cruz-Pacheco, Estava et al. 2005)*

- Description

Ce modèle met en interaction une population de moustiques vecteurs ainsi qu'une population d'oiseaux réservoirs. Le modèle est déterministe.

La population de moustiques vecteurs est répartie selon 2 états successifs : sensible (S) et infecté (I). Le recrutement dans le compartiment sensible se fait selon un taux de naissance constant proportionnellement à la quantité d'individu S. Le recrutement dans le compartiment I se fait selon deux modes : piqûre d'un oiseau infecté ou transmission verticale à partir d'œufs d'une femelle infectée. La quantité d'individus I générée par piqûre d'un oiseau infecté est proportionnelle au nombre d'oiseaux infectés et au nombre de moustiques S, alors que la quantité moustiques I générée par transmission verticale est liée à la quantité d'individus I et la proportion  $p$  de transmission verticale parmi ces individus.

La population d'hôtes réservoirs oiseaux est répartie selon 3 états successifs : sensible (S), infecté (I) et guéri (R). Le recrutement dans le compartiment S se fait selon un taux constant, non proportionnel à la population dans S. Le recrutement dans le compartiment I se fait lors d'une piqûre par un moustique infecté. Il est proportionnel au nombre de moustiques infectés et au nombre d'oiseaux S. Le recrutement dans le compartiment R se fait selon un taux constant, proportionnellement au nombre d'individus I. Ce taux représente la probabilité de guérison chez les oiseaux infectés par

le VNO. Un taux de mortalité spécifique au VNO est appliqué aux individus présents dans le compartiment I, et correspond à la probabilité de mourir pour un individu atteint par le VNO.

- Principaux résultats

Le modèle a été utilisé pour évaluer la dynamique de circulation du VNO chez différentes espèces d'oiseaux, dont le geai bleu, le quiscal, la corneille d'Amérique, le goéland, la pie ou encore le moineau domestique. Le modèle produit des simulations sur une durée de plus de 1 an, et ceci afin d'étudier l'impact de la transmission verticale chez les populations de vecteurs.

Le  $R_0$  (nombre de cas secondaires à un oiseau infecté) du modèle à l'équilibre varie selon les espèces et semble le plus élevé pour le quiscal, le geai bleu et le moineau domestique. Cela signifie que les individus de ces trois espèces seraient d'excellents candidats à la propagation et surtout l'amplification du virus lors d'une épidémie.

Le modèle prédit que si la proportion  $p$  de transmission verticale parmi les moustiques est assez haute, la maladie peut être maintenue pour toujours dans certaines régions, même avec une faible densité d'oiseaux.

Le modèle prédit aussi que, suite à une première épidémie dans une population d'oiseaux, on observe 3 ou 4 pics secondaires, correspondant à des oscillations du système, d'amplitude de moins en moins forte, jusqu'à ce que le système retrouve une position d'équilibre. Le délai entre le premier pic et le second est variable selon les espèces et de durée moyenne légèrement inférieure à 1 an. L'amplitude du second pic (et à fortiori des suivants) est beaucoup plus faible que celle du premier (de l'ordre de 1000 fois plus faible), mais sera d'autant plus grande que la durée qui se sera écoulée entre le premier pic et le deuxième sera longue.

*Modèle de Thomas (Thomas and Urena 2001)*

- Description

Ce modèle met en interaction une population de vecteurs moustiques (M), d'hôtes réservoirs oiseaux (B), et d'hôtes accidentels humains (H). Le modèle est déterministe.

La population de moustiques passe par trois états successifs : sensible (S), incubant (Inc) et Infecté (Inf). Le recrutement dans le compartiment sensible se fait à un taux constant, représentant les naissances, et proportionnellement à la quantité de moustiques présents dans S, Inc et Inf, au pas de temps précédent. Le recrutement dans le compartiment Inc se fait par infection d'individus S lors d'une piqûre sur un oiseau infecté, ou par transmission verticale depuis un parent infecté. Le recrutement dans le compartiment Inf se fait par déplacement des individus Inc dans le compartiment Inf, en fin de période d'incubation. Un taux de mortalité correspondant à un traitement adulticide est appliqué aux trois compartiments.

La population d'hôtes réservoirs oiseaux passe par trois états successifs : sensible (S), infecté (I) et guéris (R). Le recrutement dans le compartiment S se fait par naissance dans la population de S au pas de temps précédent, mais aussi dans la population de I et de R. Le recrutement dans le compartiment I se fait suite à une piqûre par un moustique infecté. Le recrutement dans la population de R se fait proportionnellement au taux de guérison des individus I, au pas de temps précédent. Un taux de mortalité lié à l'infection par le VNO est appliqué aux compartiments I et R. La transmission horizontale du virus entre deux individus n'est pas prise en compte.

La population d'hôtes accidentels humains passe par trois états successifs : sensible (S), infecté (I) et guéris (R). Le recrutement dans le compartiment S se fait à un taux constant, proportionnellement à la population présente dans les compartiments S, I et R au pas de temps précédent. Le recrutement dans le compartiment I se fait suite à la piqûre d'un individu S par un moustique infecté. Le recrutement dans le compartiment R se fait selon un taux de guérison constant proportionnellement au nombre d'individus I

au pas de temps précédent, ainsi que selon les individus R de la génération précédente ayant survécus (un individu R est considéré R pour toute sa vie).

- Principaux résultats

L'objectif du modèle était d'étudier l'impact de l'utilisation d'un traitement adulticide sur les populations de moustiques. Le modèle conclut qu'une utilisation périodique d'un traitement adulticide répété aux 2 semaines environ, permet une éradication du VNO en moins de 20 semaines.

*Modèle de Kenkre (Aguirre, Abramson et al. 2002; Kenkre, Parmenter et al. 2005)*

- Description

Ce modèle est une adaptation d'un modèle utilisé pour l'étude de la dynamique d'une infection à Hantavirus dans des populations de petits rongeurs (Aguirre, Abramson et al. 2002). Il met en interaction une population de vecteurs moustiques ainsi qu'une population d'hôtes réservoirs oiseaux. Ce modèle est déterministe.

La population de moustiques M est caractérisée par 2 états successifs : sensible (S) et infecté (I). Le recrutement dans le compartiment S se fait à taux constant, proportionnellement à la quantité d'individus S et I. Le recrutement dans le compartiment I se fait soit par piqûre d'un oiseau infecté, soit par transmission verticale depuis un adulte infecté à la génération suivante. Aux deux états S et I est appliqué un facteur environnemental traduisant la compétition entre individus de la même population au sein de leur milieu naturel pour les ressources biotiques.

La population d'oiseaux B est caractérisée par deux états successifs : sensible (S) et infectieux (I). Les équations différentielles construites pour décrire la dynamique des populations d'oiseaux sont exactement les mêmes que celles décrivant les populations de moustiques, mis à part les valeurs des coefficients (natalité, mortalité,..) qui sont adaptés aux oiseaux. Cette partie du modèle prend en considération la transmission verticale du virus chez les oiseaux, ainsi que l'existence d'une mortalité

spécifique liée au VNO chez les individus I oiseaux. La transmission horizontale entre oiseaux n'est pas prise en compte dans le modèle.

- Principaux résultats

L'objectif de ce travail est de proposer un modèle théorique de l'infection par le virus du Nil entre les populations de moustiques et d'oiseaux capable de reproduire les variations périodiques observées lors d'une épidémie.

La transmission verticale du virus chez les moustiques n'affecte pas le comportement qualitatif du système.

En revanche, un comportement oscillatoire de la fraction d'individus infectés est observé chez les oiseaux mais aussi chez les moustiques. Les oscillations sont plus amples chez les oiseaux que chez les moustiques, mais s'amortissent également chez les deux populations au bout d'un certain temps.

Enfin, les différences entre la valeur des coefficients appliqués aux populations de moustiques versus oiseaux (en particulier ceux traduisant la durée de vie des individus) engendrent un délai dans l'accession à l'état d'équilibre du système. Plus ces différences sont marquées, plus le délai s'allonge.

### ***Modèles infectieux spatiaux et spatio-temporels***

Les modèles infectieux traitant de l'aspect spatial de la propagation du VNO en Amérique du Nord sont nombreux mais peu sont de type dynamique.

### **Modèles spatiaux de régression et analyses d'agrégats**

Ces modèles sont pour la plupart des modèles de prédiction des aires à haut risque pour les populations humaines.

Deux méthodes principales sont utilisées pour la prédiction des aires à haut risque infectieux :

- Analyse des agrégats spatiaux ou spatio-temporels (Brownstein, Rosen et al. 2002; Theophilides, Ahearn et al. 2003; Johnson, Eidson et al. 2006; Reisen, Barker et al. 2006; Beroll, Berke et al. 2007);
- Construction de modèles de régression multivariée (Julian, Eidson et al. 2002), de régression logistique (Brownstein, Rosen et al. 2002) ou encore de régression de Poisson (Johnson, Eidson et al. 2006; Beroll, Berke et al. 2007) pour caractériser les régions à risque.

### **Modèle dynamique spatio-temporel de propagation du VNO**

À ce jour, deux travaux sur la dynamique spatio-temporelle de propagation du VNO en Amérique du Nord ont été publiés. Les deux articles s'intéressent à la propagation nord-sud et est-ouest du VNO en Amérique du Nord, depuis l'introduction de la maladie dans l'état de New York en septembre 1999. L'échelle de travail de ces deux modèles est donc très grande. Les approches méthodologiques utilisées dans ces deux travaux sont très différentes (modèle type automate cellulaire et modèle type multi-agents) et rendent les résultats de ces modèles difficilement comparables.

Le premier travail utilise un modèle de type automate cellulaire (Townsend Peterson, Vieglais et al. 2003) pour mimer la propagation de virus de proche en proche selon le contact entre populations de moustiques, ou encore en ajoutant à cette diffusion de proche en proche des sauts dus au transport du virus par des oiseaux migrateurs. En comparant les données simulées par le modèle aux données observées de 1999 à 2001, les auteurs ont conclu que la seule diffusion du virus par contact entre populations de moustiques ne suffit pas à expliquer la vitesse de propagation rapide du VNO observée. Ces travaux sont donc en faveur de l'intervention d'hôtes réservoirs très mobiles (comme les oiseaux migrateurs), comme 'vecteurs' du VNO à travers le continent (Townsend Peterson, Vieglais et al. 2003).

Le second travail consiste en la comparaison de deux modèles stochastiques de propagation du VNO à travers le continent Nord Américain, selon les modes de

dispersion de deux espèces d'oiseaux. La première espèce d'oiseau considérée est le moineau domestique au comportement assez sédentaire, alors que la seconde espèce d'oiseau observée est la grive de Swainson qui est un oiseau dont les migrations saisonnières le mènent à traverser le continent nord-américain. Les simulations du modèle comparées aux données observées ont amené les auteurs à conclure que la diffusion du VNO en Amérique du Nord serait plus liée à des mouvements erratiques de proche en proche, comme ceux d'espèces d'oiseaux sédentaires, plutôt qu'à de vastes mouvements de migrations bien dirigés (Rappole, Derrickson et al. 2000).

En conclusion de cette partie, nous pouvons rappeler les points clés suivants :

- À ce jour, il existe 6 modèles dynamiques qui ont étudié la dynamique du VNO entre des populations de moustiques vecteurs et d'hôtes réservoirs aviaires, selon le modèle de base d'Anderson et May;
- Les conclusions issues de ces modèles peuvent différer notablement, notamment si l'on s'intéresse à l'impact de la diminution des populations d'oiseaux sur le terme  $R_0$  de l'épidémie;
- Toutefois, les conclusions communes aux différents modèles ont trait à l'importance des densités de moustiques lors d'une épidémie de VNO, à l'efficacité des traitements adulticides pour contrôler l'épidémie, et à l'augmentation de façon précoce du nombre de cadavres d'oiseaux lors d'une épidémie (plus précocement encore que l'augmentation de la prévalence virale dans les populations de moustiques);
- Les modèles dynamiques incluant la dimension spatiale de l'épidémie sont rares. Les deux seuls modèles existants se sont penchés sur la modélisation de la vitesse de propagation du VNO en Amérique du Nord d'est en ouest et du nord au sud. Les conclusions obtenues ont tendance à se contredire puisqu'un modèle conclut que les oiseaux migrateurs ont dû jouer un rôle majeur dans cette propagation alors que l'autre conclut l'inverse.

## **Matériel, méthodes et résultats**

## **Article 1**

# **Morphological characteristics of American crow populations in southern Québec**

Antoinette Ludwig, Michel Bigras-Poulin, Stéphane Lair, Denise Bélanger

The Canadian Field-Naturalist

(soumis)

***Abstract:***

The American crow (*Corvus brachyrhynchos*) has always been a much scrutinized bird in North America, but since emergence of West Nile Virus (WNV) in North America (1999), public health authorities' attention on this bird species has increased. In Québec, as everywhere else in North America, part of the WNV surveillance programme was based on the detection of WNV mortality in the crow population. During the summer of the 2005 surveillance season, we followed an age and gender determination protocol, as well as a morphological measurement protocol, for dead crows reported for WNV status determination, to improve our knowledge of the crow population in Québec. The statistical analysis of the measurements revealed that age and gender were important factors in the morphological characterisation of the American crow. Bill depth and head-to-bill length appeared as the most important morphological variables for gender prediction through a discriminant function analysis. We also realized that, in adult age groups, our WNV positive adults carcasses had lower mean weights than carcasses that tested negative for the virus.

### ***Introduction:***

In the last century, the American crow (*Corvus brachyrhynchos*) has been the subject of research in North America (Emlen 1938; Emlen 1940; Good 1952; Johnson 1994). Interest was shown in the ecology of the species because of its important interaction with humans and crops. In 1961, Johnston conducted an extensive biosystematic study in which he described the physical characteristics of the American crow across North America. He came to the conclusion that 4 subspecies of *Corvus brachyrhynchos* existed in North America, with one main subspecies, called *C. b. Brachyrhynchos*, found in the eastern and northern regions of the continent (Johnston 1961). Other studies demonstrated the richness of crow biology by focusing on the complex social structure of the population, and on the frequent movements of crows during the year, depending on the age of individuals and the season (Verbeek and Caffrey 2002).

Since the emergence of West Nile Virus (WNV) in North America in 1999, the life history and ecology of American crows have been more intensely scrutinized (Eidson, Komar et al. 2001). Because the species has been found to be particularly susceptible to this virus (Komar, Langevin et al. 2003), crows are considered an important epidemiological sentinel for WNV in the public health surveillance system of the United-States of America and of Canada (Eidson, Kramer et al. 2001; Beroll, Berke et al. 2007). Despite this increased attention from Public Health authorities, very little is known about the crow population in Quebec, Canada, where WNV infections have been observed since 2002 in these birds (Brown and Dallaire 2002; Health Canada 2006). Carcasses collected in 2005 during the province's WNV epidemiological surveillance programme provided an excellent opportunity to carry out a study to improve our knowledge of the crow population. A descriptive study was carried out on the carcasses of dead crows that were submitted. The first objective of the study was to characterize

the crow population in Québec, while taking into account the WNV status of the carcasses, by means of gender determination and external measurements on submitted carcasses. The second objective was to build a discriminant function to predict the gender of crows with external measurements.

## ***Material and Methods***

### **Data collection**

The carcasses were collected in southern Québec, Canada, between June 6, 2005 and September 15, 2005 during the WNV surveillance programme carried out conjointly by provincial and federal agencies (Québec 2005). As part of the surveillance programme, people were advised to report dead or sick crows via a central telephone line, and therefore the sampling distribution of the carcasses was dependent on the presence of human activity in a given area and motivation of the people in that area to participate in surveillance activities. Reported carcasses were collected by wildlife conservation officers and, if they were judged to be in good enough conditions, were shipped to the Centre Québécois pour la Santé des Animaux Sauvages – Canadian Cooperative Wildlife Health Center in Saint-Hyacinthe, where samples were taken for detection of WNV. A total of 332 crows were received during the sampling period. Ten of these crows were rejected from the study due to their advanced state of decomposition. A direct diagnostic test (VecTest®, Medical Analysis Systems, Inc.) was performed on each carcass (oropharyngeal sample) to determine its status for WNV. This WNV antigen detection test was chosen because of its good specificity (between 79% and 100%) and acceptable sensitivity (between 70.4% and 92.8%) (Lindsay, Barker et al. 2003; Stone, Okoniewski et al. 2004; Stone, Therrien et al. 2005; Padgett, Cahoon-Young et al. 2006).

### **Age determination**

Carcasses were classified in 3 age classes: hatching year birds (HY), second-year birds, i.e., birds that hatched in 2004 (SY), and after-second year birds, i.e., birds that hatched before 2004 (ASY). Age class was determined in the 322 carcasses according to the following criteria: eye color, oral mucosa color, feather color, and feather shape (Emlen 1936; Good 1952; Rea 1967; Pyle 1997; Madge and Burn 1999). Color of the iris is blue in the HY and black for the SY and the ASY. Oral mucosa is pink in the HY, is marbled pink and black in the SY and completely black in the ASY. The color of oral mucosa was examined on both the mandible and the maxilla. Feather coloration is faded brown in the HY and becomes glossy black in the SY and ASY. Feather shape was also examined. In the HY, the rectrices initially have an irregular outline as well as a narrow and pointed shape. In the ASY, the rectrices become squared off or truncated with a smooth outline. Finally, the feathers of the alula (wrist of the bird) are downy in the HY and glossy-black in the ASY. The morphologic characteristics corresponding to SY are intermediate between the characteristics of HY and ASY. If, for an individual carcass, some criteria pointed toward different age classes, we retained the more frequent age class, but it was not a frequent situation (less than 5%).

### **Morphometric measurements**

It was not possible to determine the gender and complete the morphological measurements for all of the 322 carcasses because of the limited time availability of the BL3 facilities (biosecurity level). A secondary sample of 138 carcasses was selected from the 322 carcasses using a stratified non proportional random sample. The 138 selected carcasses were frozen for conservation. Stratification was done according to age and WNV status. Six age by WNV infection status groups were created (HY positive, HY negative, SY positive, SY negative, ASY positive, and ASY negative). To guarantee reasonable statistical precision in further analysis, all the carcasses remained among the HY positive group (1 carcass), the SY positive group (30), and the ASY positive group

(30). Systematic random samples were selected within the HY, SY and ASY negative groups (sample size of 23 carcasses for HY, and 27 for both SY and ASY groups). At this stage, it was impossible for us to have any knowledge of the gender of the carcasses within the 6 different age-status groups. Morphological measurements were taken on the 138 selected carcasses by one observer in order to minimize observer variability. A dial calliper and a metallic ruler were used for external measurements, and carcasses were weighted using an electronic scale (Sartorius L610; precision:  $10^{-3}$  grams). If the condition of the carcass had too much a negative effect (poor condition) on one of the measurements, that measurement was excluded from the analysis.

The method of measuring the tail, bill, tarsus and wing is as described in Pyle (Pyle 1997). Flattened wing length was taken from the blunt end of the wrist joint to the tip of the longest primary feather. Tail length was measured between the tip of the longest rectrice and the point of insertion of the two central rectrices (this insertion point corresponds to the distal end of the uropygial gland). Tarsus length was measured between the intertarsal joint and the distal end of the last scale before the toes emerge. Bill length was measured as the exposed culmen, between the tip of the feathering at the base of the bill and the bill's tip. It was important to take the feathers at the base of the bill into consideration because these feathers can be rather long in the crow. Bill depth (height of the bill) and bill width (across the bill) were taken at the anterior point of the nostril. Head-to-bill length was taken from the occipital ridge of the skull to the tip of the bill.

The gender of each crow was determined via necropsy after all external measurements were recorded.

### **Statistical methods**

The frequency distribution of each morphometric variable was obtained for each gender-and-age class group and compared to the gaussian distribution. General linear regression was performed on morphological variables using gender by age classes as the

independent variable. The residual distribution for each morphological variable was studied after removing age and gender effect in order to detect non-normality. The analysis was performed using PROC GLM in SAS (9.1 - SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

The confounding effect of West Nile virus (WNV) status on gender-and-age class group comparison was evaluated using a regression model that took into account differences in sample sizes of the gender-age-and-status groups. The dependent variables were the 8 morphological variables. The values for each morphological variable was compared between both statuses in each age-and-gender groups. The analyses were performed using PROC MIXED in SAS (9.1 - SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

We calculated our mean values and standard deviations of all the morphological variables for the 6 age and gender groups, taking into account the non proportional stratified sampling strategy (Cochran 1977). Linear regression, taking into account differences in sample sizes of the gender-and-age class groups, was used to evaluate the effect of age, gender and age\*gender interaction (independent variables) on the 8 morphological variables (dependent variables). The analyses were performed using PROC MIXED in SAS (9.1 - SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

Discriminant analysis for gender prediction from morphological variables was developed in two steps: variable selection and discriminant function construction. The stepwise selection procedure of the key variables for gender determination was performed using PROC STEPDISC in SAS (SAS 9.1 - SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). The analysis was performed using 0.15 as the significant level for adding variables in the forward selection mode, and the significant level for retaining variables in the backward elimination mode was set at 0.15. To create the discriminant functions we used PROC DISCRIM in SAS (SAS 9.1 - SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). Discriminant functions were built to predict the sex both by specific age class and for all age classes confounded.

## **Results**

Spatial distribution of the randomly selected carcasses covered a large part of southern Québec (from the USA border to Québec city), providing a good overview of the morphological characteristics of the crow population from that territory (Figure 2).

The frequency distribution for the following variables did not have a completely normal distribution: bill width and wing length for the SY and the ASY, bill depth and tarsus length for the ASY. Using general linear regression for those variables, the residuals had a slightly bimodal distribution frequency, even after removing age and gender effect. This bimodal distribution frequency was most evident for wing length for the SY and the ASY groups, and tarsus length for the ASY group.

### *Evaluation of WNV status as a confounding variable*

The tests were performed only for the SY and the ASY age-classes because the number of carcasses of both positive and negative WNV status in the HY group was very low ( $N_{HY\ WNV+ \text{ female}} = 0$ ;  $N_{HY\ WNV- \text{ female}} = 5$ ;  $N_{HY\ WNV+ \text{ male}} = 1$  and  $N_{HY\ WNV- \text{ male}} = 18$ ). WNV status appeared as a significant variable for weight in the SY group (p-value for male = 0.0019 and p-value for female = 0.0003) and in the male ASY group (p-value = 0.0162).

### *Age and gender effect on the morphological variables*

The mean values of all morphological variables for all the 6 age and gender groups are presented in Figure 3. The age effect was statistically significant for all of the morphological variables. The effect of age on weight has to be considered with caution because WNV status is a potential confounding variable for weight determination by age class. The gender effect was only statistically significant for the following variables: bill depth, head-to-bill length, and weight. Gender effect corresponded to larger morphological measurements for males in comparison with females except for wing

length in the HY group, and age effect corresponded to larger morphological measurements for older carcasses. The effect of interaction between age and gender was never significant (lowest p-value = 0.0941).

#### *Gender prediction*

During the stepwise selection procedure of the key variables for gender prediction, no variables were retained for the HY age group. Two variables were selected for the SY age group (bill depth (p-value=0.0017), and head-to-bill length (p-value=0.129)), and three variables were selected for the ASY age group (head-to-bill length (p-value<=0.001), tarsus length (p-value=0.1248), and weight (p-value=0.1226)). For the total analysis performed without age-class distinction, three variables were selected: head-to-bill length (p-value=0.003), wing length (p-value=0.0056), and weight (p-value=0.0725). The discriminant equations created are presented in Table III, along with gender classification accuracy within each age-class group, which ranges from 64.37% to 88%.

#### *Gender proportion in the dead crow population*

In the randomly sampled age-status groups, we observed that male gender was much more frequent than female gender, especially in HY age group (20.8% female in the HY group, 36.8% female in the SY group and 43.8% in the ASY group).

## **Discussion**

#### *Evaluation of WNV status as a confounding variable*

When comparing the mean values for weight in male and female SY and ASY crows for both positive and negative WNV status, we observed that mean values were lower for carcasses positive for WNV than for those negative for WNV. Since the crows in our study were picked up dead, it was not possible to know if the lower weight of the

WNV positive carcasses was related to the WNV status. Assuming that weight loss preceded the WNV infection, it could be associated with a chronic disease or a period of starvation or even coinfection with another disease that would have weakened the immune system of birds and predisposed them to a viral infection. However, no reference currently exists in the literature in favour of such a hypothesis. We can therefore speculate that weight loss follows WNV infection in American crows. It has been observed that some bird species of the Passeriformes order present a lower body condition after WNV infection (Steele, Linn et al. 2000; Gibbs, Ellis et al. 2005). As of yet, this observation was rare for the American crow (Dallaire, A.D., 2007, personal communication). This is due to the acute nature of the disease in the American crow, not allowing enough time for a change in body condition, except dehydration, that could be responsible for the weight loss (Komar, Langevin et al. 2003). However, some peripheral observations about the WNV status of wild crows, based on serological studies, suggest that this phenomenon is evolving. Serological studies conducted since 1999 have demonstrated that the proportion of crows seropositive to WNV has been increasing in North America. A study measuring seroprevalence for West Nile Virus in Georgia crows detected a seroprevalence of 2.6% [1.1; 5.8] (CI 95%)<sup>2</sup> in 2000 and 9.7% [2.6; 26.6] (CI 95%)<sup>2</sup> in 2004 (respectively 230 and 32 crows tested) (Gibbs, Allison et al. 2006). Another study conducted in 2002 in Illinois detected a 3.2% [1.2; 7.7] (CI 95%)<sup>2</sup> seroprevalence for West Nile Virus in 157 crows (Ringia, Blitvich et al. 2004). The two studies support the hypothesis of the development of a capacity for resistance against West Nile Virus infection in the crow population, allowing for the possibility that resistant individuals could stay alive for a longer time after infection than has been previously observed. This phenomenon could help explain the lower weight observed in part in our adult carcasses: the more WNV resistant adults had a longer clinical period before dying allowing for the change in body condition.

---

<sup>2</sup> CI calculated with the exact method (Fleiss, 1981)

### *Age and gender effect on the morphological variables*

The role of the bill in gender differentiation in the American crow and the role of both the bill and the tail in age differentiation in the American crow are presented in Table III (the older the crows were, the longer were their tails and their bills). It is already known that young crows are smaller than adult crows (Gauthier and Aubry 1995; Verbeek and Caffrey 2002). Males had a longer and a deeper bill than females, consistent with Clark's study on crows in Saskatchewan (Clark, James et al. 1991) and with Yaremych's study on crows in Illinois (Yaremych, Levengood et al. 2004). In crows from Saskatchewan, all of the morphological measurements reflected sexual dimorphism, including tarsus length (Clark, James et al. 1991). In crows from Illinois, all the morphological variables except the length of the tarsus varied significantly between males and females. Another characteristic that has been proposed as being gender dimorphic in crows is the observation of cloacal protuberance or brood patches in females (Pyle 1997). However, these structures can be observed only during the breeding season, which was outside our study period. In addition, these characteristics have also been reported in males due to the presence of brooding activity in both genders (Good 1952; Clark, James et al. 1991). The fact that interaction between age and gender was never statistically significant demonstrated that growth was not different between sex, and that gender dimorphism was not different between age classes. In conclusion, age and gender affect external measurements in the American crow but growth follows the same pattern in the male and female groups, and gender differentiation involves the same external structures regardless of the age class of the individual.

### *Gender prediction*

The objective of discriminant function analysis was to find the external morphological variables that would be the most useful in predicting the gender of a living bird. In previous studies, accounts of sexual variations in birds were limited to describing females as slightly smaller than males: the morphometric variables which

were different between sexes and the extent of those differences were not precisely explained (Good 1952; Gauthier and Aubry 1995; Pyle 1997; Verbeek and Caffrey 2002). Our data provided a good opportunity to build discriminant functions for the SY and ASY age classes. It was impossible to build a discriminant function for HY age class, because of the small group size. The variables selected by discriminant analysis for the SY and the ASY age groups were the most significant when evaluating the gender effect in the crow population except for the tarsus length in the ASY. Bill length was also an important variable in gender dimorphism according to our gender effect analysis but was not conserved in the discriminant function because of its strong association with head-to-bill length. Classification successes in gender determination of carcasses were good for both age classes (more than 70% of correct classification), but were best for ASY birds (more than 81% of accurate classification). This could be explained by stronger sexual dimorphism in adult crows compared with younger crows. The discriminant function built while including all carcasses (without distinguishing age class) indicated that wing length, head-to-bill length and weight were the most useful variables for gender determination. According to gender and age effect analysis, wing length, weight and head-to-bill length are variables that discriminate both for age and gender in crows. From our analysis, age emerged as a determinant variable for increasing gender predicting precision for the American crow.

#### *Gender proportion in dead crow population*

Male carcasses were much more frequent than female carcasses, especially in the HY age group. No differences in survivorship and life span between male and female have been reported in literature (Verbeek and Caffrey 2002), nor do the differences have anything to do with carcasses' WNV status, as no association has been found between WNV status and gender (Ludwig, Bigras-Poulin et al. submitted). In our study, the carcasses were collected by people. We surmise that the larger number of male carcasses collected could be linked to the observed but not clearly established behavioral

differences between males and females: males are more reckless than females (Verbeek and Caffrey 2002), and therefore have a greater probability of dying in a human occupied area and of being picked up as part of the surveillance programme.

### *Limits*

Apart from the HY female group, which was comprised of only five carcasses, and the HY WNV positive group, which only had one carcass, the number of carcasses by age class, status and gender group was large enough to allow for good statistical precision for the mean value estimation of the morphological variables. For the two HY groups, statistical conclusion must be made with caution, because such a quasi-complete separation of the data (i.e. sparse data) can create errors in statistical tests due to small group size (Dohoo, Martin et al. 2003; Mather, Mellor et al. 2007).

The objective of this study was to carry out morphometric measurements on crows from the entire province of Québec. However, this could not be achieved since crows were collected during a governmental surveillance programme (people phoning to signal the presence of dead bird to be picked up) rather than actively and randomly sampling across the target territory.

The crows sampled were carcasses rather than live birds. The frozen carcasses that we manipulated were not always in good condition (feathers were sometimes damaged; in some cases the internal organs were putrid). All this may have brought an underestimation for all of our measurements (information bias). As an example, the bill of a carcass in bad condition tends to come off, which makes measurements on the bill less precise. But as no gender or age specific decomposition process is known for crows, the underestimation of the measurements that could result from this phenomenon was considered to be uniform for all the carcasses, and therefore, we assumed that comparisons among them continued to be acceptable.

This study emphasizes that age and gender are important factors in describing morphological characteristics of crows in Québec, as in other regions of North America. The West Nile Virus status was a confounding factor for weight comparison among the SY and ASY age groups, because the WNV positive birds seemed to be thinner than WNV negative birds in this adult group.

Figure 2 : Spatial localisation of the crow carcasses collected during the 2005 West Nile Virus surveillance programme in the south of Quebec.

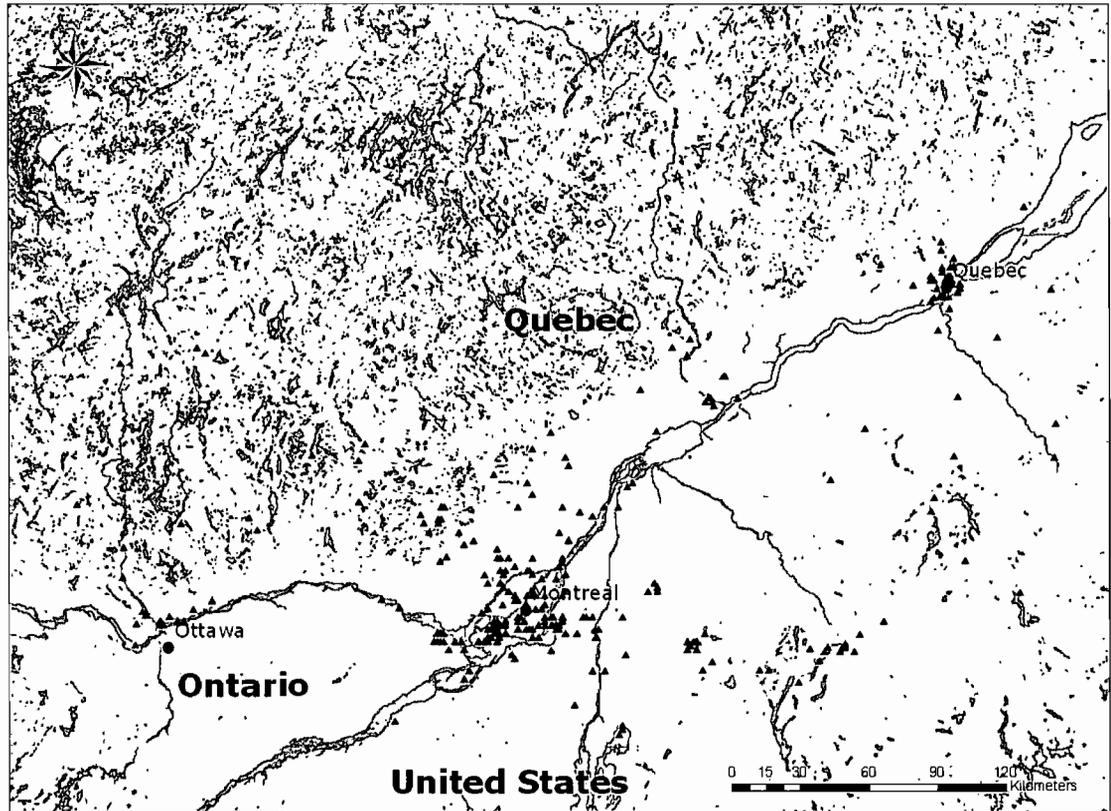
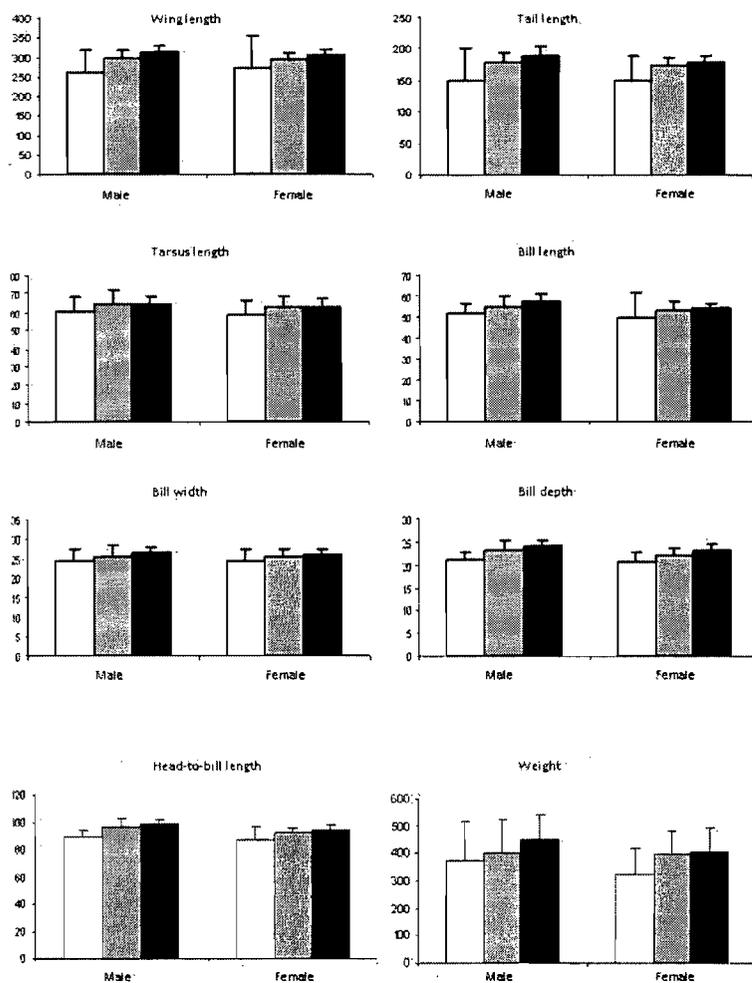


Table III : Total and Age-specific discriminant functions for gender determination of American crow carcasses in Québec.

Age	Sample size	Discriminant function	Correct classification
SY	57	Male=-468.9136+142.61782*Bill depth+64.58749*Head-to-bill length	69.44%
		Female=-439.19922+135.51637*Bill depth+63.10948*Head-to-bill length	76.19%
ASY	57	Male=-871.69621+14.69643*Tarsus length+171.68221*Head-to-bill length-0.08483*Weight	81.25%
		Female=-800.73918+17.71192*Tarsus length+162.80922*Head-to-bill length-0.09624*Weight	88%
All	138	Male=-250.17699-1.39873*Wing length+60.47778*Head-to-bill length-0.07532*Weight	64.37%
		Female=-238.90005-1.06270*Wing length+58.46411*Head-to-bill length-0.08124*Weight	80.39%

Substituting original measurements into both equations (for males and females) results in a score. The highest score corresponds to the gender category of the carcass. HY crows were not included into the analysis because of the small size group.

Figure 3 : Means and standard deviations of morphological values of crows from Quebec within each gender and age group, in 2005.



Note: Arithmetic mean length values are given in mm and weight is given in grammes. HY, SY and ASY age groups are represented by the white, grey and black bars respectively. Sample sizes for each group are the following: 19 HY Male (1 WNV+), 5 HY Female (0 WNV+), 36 SY Male (20 WNV+), 21 SY Female (10 WNV+), 32 ASY Male (16 WNV+) and 25 ASY Female (14 WNV+).

### *Acknowledgments*

The authors would like to thank Guy Beauchamp for the help in the statistical analysis, Stéphanie Brazeau, from the Public Health Agency of Canada, for the help in the spatial analysis. This work would not have been possible without the friendly cooperation of the entire CQSAS staff, especially Kathleen Brown, Judith Viau and Marie-Eve Rémy. Special thank to André D. Dallaire, from the CQSAS lab, for interesting discussions on the subject of this research paper. This project was partly supported by the Public Health Agency of Canada.

### ***Bibliography***

- Bell, J. A., C. M. Brewer, et al. (2006). "West Nile virus epizootiology, central Red River Valley, North Dakota and Minnesota, 2002-2005." *Emerging infectious diseases* 12(8): 1245-1247.
- Beroll, H., O. Berke, et al. (2007). "Investigating the spatial risk distribution of West Nile virus disease in birds and humans in southern Ontario from 2002 to 2005." *Population Health Metrics* 5(3): 1-16.
- Brown, K. and A. Dallaire (2002). *Surveillance pour la détection précoce de l'infection par le virus du Nil Occidental chez les oiseaux sauvages au Québec, Saison 2002*, Centre Québécois sur la Santé des Animaux Sauvages - Département de pathologie et microbiologie - Faculté de Médecine Vétérinaire - Université de Montréal- Québec - CANADA: 62pp.
- Clark, R. G., C. J. James, et al. (1991). "Sexing adult and yearling American crows by external measurements and discriminant analysis." *Journal of Field Ornithology* 62(1): 132-8.
- Cochran, W. G. (1977). *Sampling Techniques* - 3rd edition. New-York, John Wiley and Sons (Eds).
- Dohoo, I., W. Martin, et al. (2003). *Validity in observational studies*. *Veterinary Epidemiologic Research*. S.Margaret McPike (Ed.). Charlottetown, Prince Edward Island, Canada: 706pp.

- Eidson, M., N. Komar, et al. (2001). "Crow Deaths as a Sentinel Surveillance System for West Nile Virus in the Northeastern United States, 1999." *Emerging Infectious Diseases* 7(4): 615-620.
- Eidson, M., L. Kramer, et al. (2001). "Dead Bird Surveillance as an Early Warning System for West Nile Virus." *Emerging Infectious Diseases* 7(4): 631-635.
- Emlen, J. T. J. (1936). "Age determination in the American crow." *The Condor* 38: 99-102.
- Emlen, J. T. J. (1938). "Midwinter distribution of the American crow in the New York State." *Ecology* 19(2): 264-275.
- Emlen, J. T. J. (1940). "The Midwinter distribution of the crow in California." *The Condor* 42: 287-294.
- Gauthier, J. and Y. Aubry (1995). *Corneille d'Amérique. Les oiseaux nicheurs du Québec - Atlas des oiseaux nicheurs du Québec méridional*. Société québécoise de protection des oiseaux, Association québécoise des groupes d'ornithologues, Service canadien de la Faune, Environnement Canada, Région du Québec Montréal (Canada): 726-729.
- Gibbs, S. E. J., A. B. Allison, et al. (2006). "West Nile virus antibodies in avian species of Georgia, USA: 2000-2004." *Vector borne and zoonotic diseases* 6(1): 57-72.
- Gibbs, S. E. J., A. E. Ellis, et al. (2005). "West Nile virus detection in the organs of naturally infected blue jays (*Cyanocitta cristata*)." *Journal of Wildlife Diseases* 41(2): 354-362.

- Good, E. E. (1952). The life history of the American crow-*Corvus brachyrhynchos* Brehm, Ohio State University. Degree Doctor of Philosophy: 188pp.
- Health Canada (2006). "Virus du Nil Occidental MONITEUR." 2007, from [http://www.phac-aspc.gc.ca/wnv-vwn/index\\_f.html](http://www.phac-aspc.gc.ca/wnv-vwn/index_f.html).
- Johnson, R. J. (1994). American crows. Prevention and control of Wildlife Damage. S.E. Hygnstrom, R.M. Timm and E.L. Larson (Eds). University of Nebraska - Lincoln, United States Department of Agriculture. E: 33-40.
- Johnston, D. W. (1961). The biosystematics of the American crows. Seattle, University of Washington Press (Ed).
- Komar, N., S. Langevin, et al. (2003). "Experimental infection of North American birds with the New York 1999 Strain of West Nile Virus." *Emerging Infectious Diseases* 9(3): 311-322.
- Lindsay, R., I. Barker, et al. (2003). "Rapid antigen-capture assay to detect West Nile virus in dead corvids." *Emerging Infectious Diseases* 9(11): 1406-1410.
- Ludwig, A., M. Bigras-Poulin, et al. (submitted). "Risk factors associated with West Nile virus mortality in crow populations in southern Quebec." *Journal of Wildlife Diseases*.
- Madge, S. and H. Burn (1999). *Crows and Jays*. Princeton University Press (Ed.) New Jersey.

- Mather, A. E., D. J. Mellor, et al. (2007). Data sparsity and separation in multidimensional covariate space: approaches to a common epidemiological problem. Proceedings of the society for veterinary epidemiology and preventive medicine, Dipoli, Helsinki/Espoo, Finland.
- Mörner, T., D. L. Obendorf, et al. (2002). "Surveillance and monitoring of wildlife diseases." *Rev.sci.tech.Off.int.Epiz.* 21(1): 67-76.
- Pyle, P. (1997). Identification guide to North American birds, Part I. Slate Creek (Ed.), Bolina, California, USA.
- Québec, Ministère de la Santé et des Services Sociaux (2005). Plan d'intervention gouvernemental de protection de la santé publique contre le virus du Nil Occidental 2005. Direction des Communications du Ministère de la Santé et des Services Sociaux: 1-17.
- Rea, A. M. (1967). "Age determination of Corvidae, Part I: Common crow." *Western Bird Bander* 42: 44-47.
- Ringia, A. M., B. J. Blitvich, et al. (2004). "Antibody prevalence of West Nile virus in Birds, Illinois, 2002." *Emerging Infectious Diseases* 10(6): 1120-1124.
- Steele, K. E., M. J. Linn, et al. (2000). "Pathology of Fatal West Nile Virus Infections in Native and Exotic Birds during the 1999 Outbreak in New York City, New York." *Vet Pathol* 37: 208-224.

Stone, W. B., J. C. Okoniewski, et al. (2004). "VecTest as diagnostic and surveillance tool for West Nile virus in dead birds." *Emerging Infectious Diseases* 10(12): 2175-2181.

Verbeek, N. A. M. and C. Caffrey (2002). American crow (*Corvus brachyrhynchos*) - Account Nb647. *The birds of North America*. A. Poole and E. Gill (Eds.) Academy of Natural Sciences, Philadelphia, Pennsylvania, and American Ornithologists' Union, Washington, D.C., USA.

Yaremych, S. A., J. M. Levensgood, et al. (2004). "Gender determination and lack of sex-specific West Nile virus mortality in American crows." *Wildlife Society Bulletin* 32(3): 893-9.

**Article 2**

**Risk factors associated with West Nile virus  
mortality in crow populations in southern Quebec**

Antoinette Ludwig, Michel Bigras-Poulin, Pascal Michel, Denise Bélanger

Journal of Wildlife Diseases

(soumis)

## ***Abstract***

Soon after the appearance of West Nile virus (WNV) in North America, a number of public health authorities designated the American crow (*Corvus brachyrhynchos*) a sentinel for WNV detection. While preliminary studies have suggested there was a positive association between crow mortality and increased risk of WNV infection in humans, we still know little about dynamic variation in crow mortality, both baseline levels and mortality associated with WNV. We hypothesized that the complex social behavior of crows, which is shaped by age and seasonal factors, influences both baseline mortality and WNV mortality in crow populations. We examined crow mortality data from Quebec for the 2005 WNV surveillance year, which lasted from June 5 to September 17, 2005. The variables of interest were age (hatching year = HY, second year = SY and after second year = ASY), gender (male/female), body condition index (BCI), time interval (4 subdivisions of the study period: T1 to T4) and area (urban/non-urban). We used a log-linear model to examine baseline mortality. Logistic regression and general linear regression models were constructed to examine mortality due to WNV. We found that both age and time interval were key variables in explaining baseline mortality. These same two variables were also risk factors for WNV mortality. The probability that a carcass tested positive for WNV increased with the age of the dead bird and as summer progressed. WNV-positive carcasses also had a lower BCI than WNV-negative carcasses. We believe that the first major wave of crow mortality observed in the early summer of 2005 was the result of natural mortality among young crows. Our data suggest that second-year crows play a major role in propagating WNV during their movements to urban areas in midsummer.

***Key Words:***

West Nile virus mortality, American crow, population dynamics, risk factors, baseline mortality

## ***Introduction***

In 1999, West Nile virus (WNV) made its first appearance in North America in New York State (Marfin, Petersen et al. 2001; Ludwig, Calle et al. 2002; McLean, Ubico et al. 2002). It struck immunologically naive populations, resulting in widespread mortality in birds and mammals (Kulasekera, Kramer et al. 2001). The epidemiological cycle of the virus requires an arthropod vector – generally a mosquito – and a bird reservoir. So far, it seems that the most sensitive bird species are passerines, as illustrated by the high mortality rate of the latter when infected experimentally (Komar, Langevin et al. 2003; Meulen, Pensaert et al. 2005). This means that passerines could potentially act as sentinels for WNV in North America.

One passerine species in particular has caught the attention of the scientific community – the American crow (*Corvus brachyrhynchos*). While this species has a lower index of reservoir competency for WNV transmission than does the blue jay (*Cyanocitta cristata*), common grackle (*Quiscalus quiscula*) or house finch (*Carpodacus mexicanus*) (Komar, Langevin et al. 2003), it has been selected as the best sentinel for WNV detection for several reasons. First, crows are found in high densities throughout North America (Gauthier and Aubry 1995; Verbeek and Caffrey 2002), especially in urban areas (Marzluff and Neatherlin 2006). Second, they are large in size and so their carcasses are easily located (Caffrey, Weston et al. 2003). Finally, the mortality rate associated with infection is very high in this species (Komar 2001; McLean, Ubico et al. 2001; Julian, Eidson et al. 2002; Komar, Langevin et al. 2003; Watson, Jones et al. 2004).

Despite the proximity of Ontario to New York State, the virus was only first detected on dead birds in Ontario in 2001 (Public Health Agency of Canada 2001). The arrival of WNV in Canada resulted in high mortality in both passerines (Barker and Campbell 2003) and non-passerines, including owls (Gangz, Barker et al. 2004). It also

caused 394 cases of morbidity in humans in 2002 (Public Health Agency of Canada 2004). The virus arrived in Quebec in 2002, causing encephalitis in 20 people (Brown and Dallaire 2002; Public Health Agency of Canada 2007). The government implemented a surveillance programme for WNV detection in Quebec in the summers of 2003, 2004 and 2005. This programme encompassed human, mosquito and corvid surveillance (Vincent, Brown et al. 2003; Vincent and Brown 2004; Brown, Côté et al. 2005).

For this study, we analyzed crow carcasses recovered by the surveillance programme in 2005. At that time, it was believed that the virus had been present in Quebec since 2002. The behavior of the American crow is complex, involving many migratory movements both within and between seasons (Marzluff, McGowan et al. 2001; McGowan 2001; Marzluff and Neatherlin 2006). We hypothesized that WNV circulation among crows is influenced by the social behavior and migratory movements of crows and that this would be reflected in a risk factor analysis of mortality due to WNV.

The objectives of this study were to: 1) characterize the dynamics of baseline mortality in crow populations based on the recovery of WNV-negative crow carcasses; 2) characterize the dynamics of WNV mortality based on the recovery of WNV-positive crow carcasses; and 3) analyze some factors associated with WNV mortality in crow populations in southern Quebec, Canada.

## ***Materials and Methods***

### **Sample collection and characterization**

The crow carcasses were collected as part of the provincially run WNV surveillance programme in Quebec (Brown, Côté et al. 2005). The scenario tree for this surveillance programme is presented in Figure 4 (Martin, Cameron et al. 2007). The

sample consisted of 332 crow carcasses collected between June 5 and September 17, 2005. These carcasses had been found by the public and then picked up by wildlife conservation officers, packed in an icebox and sent to the laboratory of the Canadian Cooperative Wildlife Health Centre in Saint-Hyacinthe, Quebec. Only birds in reasonable condition were sent to the laboratory.

#### *Determination of WNV status*

The WNV status of each of the 332 carcasses was determined by taking an oral swab (Brown, Côté et al. 2005) and then testing it using VecTest® (Medical Analysis Systems Inc.). This test has been shown to have relatively good specificity (between 79% and 100%) and sensitivity (between 70.4% and 92.8%) (Lindsay, Barker et al. 2003; Stone, Okoniewski et al. 2004; Stone, Therrien et al. 2005; Padgett, Cahoon-Young et al. 2006).

#### *Definition of time intervals*

We assumed that the discovery date of the carcass was a reasonable approximation of the actual date of death as crow carcasses remain visible on the ground for only a very short period of time: 1.6 days in rural areas and 2.1 days in urban areas (Ward, Stallknecht et al. 2006).

Four time intervals (T) were used to examine the association between mortality and time of the year: T1 (June 5 to July 2), T2 (July 3 to July 23), T3 (July 24 to August 27), and T4 (August 28 to September 17). We selected these time intervals based on crow biology (Verbeek and Caffrey 2002; Withey and Marzluff 2005). T1 corresponds to when fledglings make their first flight, while T2 coincides with the period during which hatching-year birds and auxiliaries move to urban areas (Kilham 1984). Auxiliaries are birds that forego breeding but are associated with a breeding territory in either a helping or nonhelping capacity; they are usually second-year birds (Verbeek and Caffrey 2002). During T3, there is a spatial division of the population: adult birds stay

on their breeding territories, which are often in rural areas, while hatching-year birds and auxiliaries are in urban areas where food is easier to obtain (Caffrey 1992; Marzluff and Neatherlin 2006). During T4, crows of all ages flock together in rural or suburban areas in preparation for autumn migration.

#### *Determination of age*

We classified the carcasses according to three age classes. Ten of the 332 carcasses could not be classified due to their poor condition. The classification was based on oral mucous membrane coloration, which changes from pink to black as the bird ages (Pyle 1997). The three age classes were: hatching year (HY) that is crows that hatched in 2005; second year (SY) that is crows that hatched in 2004; and after second year (ASY) that is crows that hatched in 2003 or earlier. To simplify our model, we assumed that all SY birds are auxiliaries and all ASY birds are reproductive adults. This is an over-simplification because under some circumstances SY birds continue to be auxiliaries until three, four or even five years of age (Kilham 1984; Caffrey 1992).

#### *Determination of gender and morphological measurements*

It was not possible to determine gender and take morphological measurements for all 322 carcasses because of the limited availability of bio-safety level 3 facilities. We therefore selected 138 carcasses from the total of 322 carcasses using stratified non-proportional random sampling (Figure 5). The stratification generated six combinations based on age and WNV infection status: HY positive, HY negative, SY positive, SY negative, ASY positive and ASY negative. To ensure reasonable statistical precision in further analyses, we used all WNV-positive carcasses: 1 for HY, 30 for SY and 30 for ASY. We randomly selected carcasses for the HY, SY and ASY negative groups, yielding final sample sizes of 23, 27 and 27, respectively.

We determined the gender of each bird using necropsy and abdominal cavity exploration. We also took a variety of morphological measurements: wing length, tail

length, tarsus length, head-to-bill length, bill length, bill depth, bill width and weight. Details on the measurement techniques can be found in the literature (Pyle 1997).

#### *Body condition index*

We calculated the body condition index (BCI) using a proposed method in which BCI is the body mass relative to the structural size of the carcass (Brown 1997). This method enabled us to compare the body condition of crows of different sizes. BCI values are the raw residuals ( $BCI = \text{predicted value} - \text{observed value}$ ) of a general linear model predicting weight using a structural dimension measure, which in this case was head-to-bill length. We created the general linear model in SAS using Proc GLM (SAS version 9.1, SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA).

#### *Classification of land cover (urban versus non-urban)*

Each carcass was assigned the geographical coordinates of the civic address of the location where it was discovered. We assume that these coordinates are a reasonable approximation of the geographical area in which the bird lived.

We classified the study area into urban and non-urban land cover using a methodology employed in previous studies (Marzluff, Bowman et al. 2001). Our land use data covered an area around Montreal (Quebec) with the following coordinates:  $45^{\circ}0' < \text{latitude} < 46^{\circ}6'$  and  $-74^{\circ}2' < \text{longitude} < -72^{\circ}17'$ . Only 160 of the 332 carcasses were found in this region (Figure 5).

We used two different sources of spatial data for classifying land cover as urban or non-urban: CanMap Streetfiles (DMTI\_Spatial 2005) and LandSat (Savoie, P. et al. 2005). Areas designated commercial, government/institutional, residential, or resource/industrial in CanMap were classified as urban open area, park and recreational location or water body were classified as non-urban. When CanMap data were not available, we used Landsat. Areas designated as annual culture, permanent culture, forest, regeneration, recently cut forest, water, wetland or peat bog in Landsat were

classified as non urban in our scheme, and areas designated as urban in Landsat were likewise classified as urban in our scheme. The spatial analyses for classification of land cover were performed using ArcGIS (ArcGIS Desktop 9.2, ESRI (2006)).

We calculated the frequency of carcasses recovered (out of a total of 160 carcasses) for each age class, WNV status and land cover in order to determine if some stratified groups had no or few observations.

### **Data analysis**

We first analyzed weekly frequencies for positive, negative and total collected crow carcasses over the surveillance period. We then examined frequencies for total collected carcasses and for positive carcasses by gender, age and time interval.

#### *Analysis of baseline mortality*

In this analysis, baseline mortality corresponds to natural mortality (WNV negative). A log-linear model was used to explore the effects of time interval and age (categorical variables) on the number of WNV-negative carcasses recovered during the surveillance season. In this model, the response variable was the frequency of WNV-negative carcasses and the study variables were age, time interval, and the interaction between age and time interval. Some specific comparisons were made (HY versus ASY for T1, HY versus SY for T1, and HY for T1 versus ASY for T4). We generated 95% confidence intervals for the odds ratio (OR) of these estimates using Wald's method (Dohoo, Martin et al. 2003). The effect of land cover (urban versus non-urban) on number of WNV-negative carcasses could not be examined due to the absence of observations for some land cover. The effects of gender and BCI could not be examined because of the stratified non-proportional sampling strategy (Figure 5).

*Risk factor analysis for WNV positive carcass mortality*

Using all recovered WNV-positive and WNV-negative carcasses, we constructed two simple logistic regression models in order to evaluate the unconditional association between age (n=322) and land cover (n=160) and the probability of a carcass recovered by the provincially run surveillance programme testing WNV positive (Figure 5). We have called this association **WNV positive carcass probability**. Confidence intervals of 95% for the odds ratio (OR) were generated using Wald's method (Dohoo, Martin et al. 2003). Time interval effects could not be evaluated for the whole dataset because of quasi-complete separation of the data with no WNV-positive carcasses being identified for T1.

A multiple logistic regression model was constructed to predict WNV positive carcass probability based on age and time interval (n=139). Land cover was not retained in the model because the preceding simple logistic regression found no significant relationship between land cover and WNV status (p-value = 0.1576). The quasi-complete separation observed in the HY data, as well as in T1 and T2 data, caused a lack of convergence for parameter estimation using a traditional maximum likelihood estimation method (Dohoo, Martin et al. 2003; Mather, Mellor et al. 2007). Consequently, the analysis was restricted to the SY and ASY age classes and to time intervals 3 and 4 in order to obtain meaningful coefficients. The model began with age, time interval and the interaction between age and time interval. A backward selection of the variables was then performed, which removed variables with p-values of greater than 5%. We generated 95% confidence intervals for the odds ratio (OR) using Wald's method (Dohoo, Martin et al. 2003).

*BCI and gender variation according to age and WNV status*

We evaluated variation in mean BCI values between all age and WNV status groups using a general linear model (n=138) (Figure 5). The predicted variable was BCI and the predicting variables were age, WNV status and the interaction between age and

WNV status. We assessed variation in the proportion of females between all age and WNV status groups by building a multiple logistic regression model for predicting gender based on age, WNV status and the interaction between age and WNV status (Figure 5). For this model, it was not possible to retain the HY age class in the analysis due to the quasi-complete separation of the data, as there was no WNV-positive HY carcasses in the sub-sample where gender was estimated.

We built the general linear model using Proc GLM in SAS and performed the log-linear analysis using Proc GENMOD in SAS. The simple logistic regressions were performed using Proc LOGISTIC in SAS, and the multiple logistic regressions using Proc GENMOD in SAS.

## ***Results***

### **Data description**

Fluctuations in frequencies of positive and negative carcasses are shown in Figure 6. In total, 69 WNV-positive and 263 WNV-negative carcasses were collected during the surveillance period. At the launch of the surveillance programme, the frequency of carcass recovery was high: approximately 25 carcasses/week. The first wave of carcasses found (between June 5 and July 23) were almost exclusively WNV negative (Figure 6(a)). Only one was WNV positive; it was recovered on July 11. From July 24 onwards, the frequency of negative carcasses decreased from 25 to about 10 carcasses/week, while the number of positive carcasses increased. As shown in Figure 6(a), the first wave of mortality for WNV-positive birds took place from July 24 to August 13, with mortality peaking between July 31 and August 6. The second wave of mortality began on August 14 and ended on September 17, with maximal mortality occurring between August 28 and September 3.

Figure 6 also shows temporal changes in the frequency of carcasses recovered for each age class. Figure 6(b) illustrates the frequent mortality among WNV-negative HY

birds between June 5 and July 23. This early mortality wave had a bimodal shape with the first peak occurring between June 12 and June 25 and the second between July 17 and July 23. During the entire surveillance period, only 2 HY carcasses were WNV positive; the first was recovered on July 11 and the second on August 25. There was a considerable decrease in the number of HY-negative carcasses recovered after July 24; only 1–2 carcasses/week were identified after this date and up to the end of the surveillance period.

In Figure 6 (c), the temporal changes in the frequency of negative SY carcasses recovered are represented by a bimodal curve, with the first wave ending on approximately August 6. The maximum frequency was higher for the first wave than the second wave: 17 carcasses/week versus 10 carcasses/week. The bimodal shape of this curve is very similar to that found for the entire population (Figure 6 (a)). For SY birds, the first wave of mortality for positive carcasses ended around August 20. A second wave had two peaks: one at 6 carcasses/week from July 31 to August 6, and another at 10 carcasses/week between August 21 and September 10.

In part (d) of Figure 6, the frequency curve for negative ASY carcasses is approximately bimodal in shape. The first wave occurred between June 5 and July 30, with a maximum of 8 carcasses/week being recovered between June 19 and June 25. The second wave took place between July 31 and September 17, with a maximum of 5 carcasses/week being recovered between August 22 and September 3. The first positive ASY birds were recovered on July 24 and the frequency curve for subsequent dates is very similar to that for positive SY birds. There are two mortality peaks: one between August 7 and August 13 and another between September 4 and September 10. The first peak is smaller than the second: 4 carcasses/week versus 8 carcasses/week.

Table IV displays the frequency distribution for both WNV positive and total carcasses according to age, gender and time interval. The frequencies correspond to the stratified non-proportional sample of carcasses from which gender and BCI were

determined. There were no positive carcasses identified during T1 or T2. For the HY age class, 1 positive carcass was identified for T3 but none for T4.

The absence of positive carcasses for certain explanatory patterns may lead to quasi-complete separation of the data and therefore make it difficult to build either logistic or log-linear regression models based on maximum likelihood coefficient estimations (Dohoo, Martin et al. 2003; Mather, Mellor et al. 2007). There are two choices when this occurs: reduce the database or modify the coefficient estimation technique. The second option generates approximations that may vary greatly depending on the chosen technique (Mather, Mellor et al. 2007). We therefore chose to reduce our database to create a new one without any empty categories. Thus, we limited our analysis to the SY and ASY age classes and to time intervals 3 and 4 for the multiple logistic regression.

#### **Factors associated with baseline mortality**

In the log-linear analysis of number of WNV-negative carcasses, all of the variables (age, time interval and the interaction between age and time interval) were very significant ( $p < 0.0001$ ). Therefore, the number of negative carcasses recovered varied with age class and time interval.

Contrast estimates for T1 show that negative HY carcasses were more numerous than negative ASY carcasses (OR = 2.75 [1.72; 4.38]) or negative SY carcasses (OR = 3.30 [2.00; 5.44]). Negative HY carcasses during T1 were also more numerous than negative ASY carcasses during T4 (OR = 7.33 [3.65; 14.71]).

#### **Risk factors for WNV-positive mortality**

In the simple logistic regression, the age effect was very significant. The younger the carcass, the smaller the risk of a carcass being WNV positive (OR<sub>HY versus ASY</sub> = 0.042 [0.010, 0.180] with  $p < 0.0001$ ) (protective factor), and OR<sub>SY versus ASY</sub> = 0.581 [0.328, 1.028] with  $p = 0.0622$  (protective factor)). The variable land cover was not significant

(OR<sub>non-urban versus urban</sub>=0.753 [0.387, 1.467] with p=0.4048). Table V shows the frequency distribution for both positive and negative carcasses according to age and land cover.

Table VI presents the results of the multiple logistic regression model (T1, T2 and HY were not included in this analysis). The final reduced model contains a single variable, time interval (p-value = 0.02). The odds ratio associated with the reduced model indicates that the probability of being WNV positive is lower for a carcass reported during T3 than during T4. Age (p=0.14) and the interaction between age and time interval (p=0.66) were eliminated during the backward selection procedure.

#### **The effects of BCI and gender according to age class and WNV status**

According to the general linear model, there were no differences in mean BCI between the three age classes (p-value = 0.58). Mean BCI was lower for WNV-positive carcasses than for WNV-negative carcasses (p-value < 0.01). The interaction between age and WNV status was not statistically significant (p-value = 0.27), indicating that the differences in BCI between the WNV status categories were similar across the three age classes.

The logistic regression was built using WNV status and two age classes (SY and ASY) to predict the proportion of carcasses that were female. The results were not significant for age (p-value = 0.47), WNV status (p-value = 0.92) and the interaction term between age class and status (p-values ranging from 1.00 to 0.29). Therefore, these variables did not account for differences in the number of male versus female carcasses in the sample.

## ***Discussion***

### **Characteristics of baseline crow mortality**

The fledging period is a difficult time for HY birds because they often find themselves defenseless on the ground and at the mercy of predators because they have difficulty flying to safety in trees. According to many authors, the annual mortality rate for HY crows is in the range of 40% to 60% (Good 1952; Chamberlain-Augur, Augur et al. 1990; Verbeek and Caffrey 2002). Previous studies have also found temporal variation in annual mortality rates toward the end of the breeding season in June and July (Good 1952). In our study, high mortality was observed in the HY age class at the beginning of the surveillance season. This WNV-negative mortality was likely associated with fledgling mortality, an annual occurrence during this period. Research has shown that if the first reproductive effort fails, a crow pair will start again three to four weeks after the first laying (Emlen 1942; Good 1952). In our study, the peak of the second WNV-negative mortality for HY birds occurred between July 17 and July 23 (Figure 6), about three to four weeks after the first mortality wave. This is consistent with fledgling mortality in second broods. It seems, therefore, that both of the mortality waves for negative HY birds seen in Figure 6 are due to natural annual phenomena.

Since the arrival of WNV in North America, many studies have been conducted to validate early crow mortality as an indicator of virus circulation (Eidson, Miller et al. 2001; Julian, Eidson et al. 2002; Theophilides, Ahearn et al. 2003; Watson, Jones et al. 2004; Johnson, Eidson et al. 2006). Several of these studies have concluded that non-specific crow mortality at the beginning of or throughout the surveillance season is associated with an increased risk of WNV circulation among crows and humans living in the same region. This interpretation is not supported by our findings. Each year there is significant mortality of HY birds that is not associated with WNV circulation (Good 1952). This finding also serves to highlight the importance of determining if there is a

causal link between two associated variables, in this case crow mortality and increasing risk for WNV transmission to humans.

Intra-seasonal variation in the mortality rates of SY and ASY age classes has already been observed but no explanations have been offered (Good 1952). We also observed seasonal variation in mortality for SY birds, with the highest WNV-negative mortality frequencies occurring before July 30 (Figure 6, part (c)). After this date, mortality decreased for the SY age class. Unfortunately, carcass necropsy did not allow us to explore other causes of mortality, and it was not possible to associate this seasonal variation with any specific cause other than WNV.

It is interesting to note that the number of negative SY carcasses was generally twice as large as the number of negative ASY carcasses (Figure 6). This suggests that baseline mortality is higher for SY crows than for ASY crows, a finding that is supported by the literature (Good 1952; Verbeek and Caffrey 2002).

For SY and ASY age classes, there were no gender differences in mortality rates associated with WNV-negative status. This is consistent with the literature, which does not report any gender differences in specific baseline mortality rates (Verbeek and Caffrey 2002). However, the quasi-separation of the data required us to exclude the HY age class from the analysis, and WNV-negative male carcasses were much more numerous than WNV-negative female carcasses (18 males versus 5 females). If this age class could have been included, perhaps the results would have indicated a larger number of male crows dying than females in the WNV-negative HY group.

### **Characteristics of WNV positive crow mortality**

#### *Age and time interval*

Age and time interval appear to be important factors in determining the dynamics of WNV circulation in crow populations. This is confirmed by our statistical analysis

that indicated age and time interval to be significant risk factors for WNV positive carcass probability. It appears that WNV circulated in the crow population after July 30, reaching SY birds before ASY birds. It should be noted that only time interval was retained in the multiple regression model presented in Table VI when in competition with the age variable. However the multiple regression was performed without including the HY age class and time intervals 1 and 2. If we had been able to include all age and time interval categories in our analysis, the results of the multiple regression may have been different (Figure 6). For this reason, age cannot be excluded as a major risk factor for mortality due to WNV.

Age can be considered a risk factor associated with individual characteristics. In midsummer, a period when both SY and HY crows are present in the same geographical area (Caffrey 1992; Withey and Marzluff 2005; Marzluff and Neatherlin 2006), it appears that some SY birds died from WNV but HY birds did not (Figure 6). Toward the end of the summer, ASY, SY, and HY crows gather together in rural or suburban areas (Caffrey 1992; Withey and Marzluff 2005; Marzluff and Neatherlin 2006). In our study, it appears that HY birds suffered much lower mortality due to WNV in comparison to SY and ASY birds, leading us to conclude that young birds are somehow protected against WNV infection. Previous studies have explored the impact of age on WNV sensitivity. Two studies have shown that sensitivity to WNV increases with age: one on geese with an Israeli strain (McLean, Ubico et al. 2002) and another on chickens with an Egyptian strain (Malkinson, Banet et al. 2001). While both the Egyptian and Israeli strains closely resemble the NY99 strain present in North American, neither geese nor chickens are passerines (Ludwig, Calle et al. 2002; Meulen, Pensaert et al. 2005), which limits the comparability of these results to our findings. In 2002, during a WNV epidemic in an Ontario owl population, HY owls were more resistant to WNV than were adult owls (Gangz, Barker et al. 2004). Additionally, during the WNV surveillance programme for corvids from 2004 to 2006 in Ontario, and for 2003 and 2004 in Quebec, the same phenomenon was observed: although HY carcasses were more numerous than

SY and ASY carcasses, the proportion of HY carcasses testing positive for WNV was smaller than the proportion of SY carcasses testing positive plus the proportion of ASY carcasses testing positive (Vincent, Brown et al. 2003; Vincent and Brown 2004; Barker and Massey 2007). This reinforces our conclusion that young crows are protected against WNV. This protection could be due to differences between the HY class and older age classes in physiology (for example, hormones or maternally transmitted antibodies) or behavior (for example, feeding habits).

Age can be considered a collective risk factor through the link between age and crow behavior. The wave pattern of temporal variations in mortality due to WNV is consistent with WNV spreading from one age class to another within the crow population (Figure 6). The gap of 1–2 weeks between the WNV mortality peak in the SY and ASY age classes would suggest that the two age classes are spatially segregated. WNV appears to reach SY birds prior to ASY birds and during the time of year when SY are in urban areas (Marzluff and Neatherlin 2006). It can be speculated that the infection of SY birds occurs in urban areas where crow densities are high, thereby facilitating circulation of the virus. The virus then propagates beyond urban areas and to ASY populations because of the continuous movements between urban and non-urban areas by vagrant crows (Stouffer and Caccamise 1991; Caccamise, Reed et al. 1997). The proportion of vagrant crows in a crow population can be as high as 36% (4 of 11 individuals in a group) and appears to change according to season and food source (Stouffer and Caccamise 1991; Caccamise, Reed et al. 1997).

Crow behavior during the summer season appears to be the result of a complex interaction between time interval, age and land cover (urban versus non-urban). For this reason, it is impossible to discuss age or time interval without considering land cover. In Illinois, a study conducted in 2002 demonstrated a strong association between SY birds and urban areas (Yaremych, Novak et al. 2004). It found that ASY birds were strongly associated with rural areas during the summer and early autumn. In our study, we found that age and time interval, but not land cover, were significant factors. The chosen

classification scheme of urban versus non-urban should reflect crow biology as it was directly inspired by a study of crows conducted in New York State (Marzluff, Bowman et al. 2001; Marzluff, McGowan et al. 2001). However, certain measurement errors may have been introduced and prevented us from detecting significant associations between age class and land cover. For example, there may have been measurement errors associated with our definition of land cover, the use of spatial data, or classification of carcasses by land cover. Perhaps a land cover classification scheme based on the single coordinates of the civic address where a carcass is found should be replaced by one based on the spatial characteristics of a buffer zone around the carcass. Likewise, the existence of a high proportion of vagrant crows in the population from which our carcasses were sampled (Stouffer and Caccamise 1991) could lead to errors in the land cover type classification of crows that are not vagrant.

#### *Body condition index and gender*

According to our results, WNV-positive carcasses had lower BCI than WNV-negative carcasses. This lower BCI could have been caused by dehydration or poor body condition after WNV infection. The high sensitivity of crows to WNV, the high rate of mortality following WNV infection and the swiftness of death – approximately 7 days post-infection (Ludwig, Calle et al. 2002; Komar, Langevin et al. 2003) – could cause major dehydration or a lowered BCI in the infected crow.

The low BCI could also have preceded WNV infection. A low BCI often signifies chronic disease and the resulting loss of efficient immune response, and/or a predisposition to develop another disease (in this case, WNV infection).

Since 1999, the number of WNV-serologically positive live crows has risen from 10% to 50% (Ringia, Blitvich et al. 2004; Bell, Brewer et al. 2006; Gibbs, Allison et al. 2006). This signifies non-fatal contact and the development of individual resistance to WNV, which would diminish mortality due to positive WNV status. An increasing resistance to the virus within the population should be associated with an increasing

level of seropositivity for the virus. At present, the proportion of WNV-seropositive crows in Quebec is unknown.

Gender was not identified as a risk factor associated with WNV-positive status in crow carcasses, a finding that is consistent with the literature (Yaremych, Levensgood et al. 2004).

### **Limits imposed by the surveillance scenario tree**

There are various limitations associated with the data that we used and the accuracy with which WNV positive carcass probability reflects the actual risk of a live crow dying from WNV. In order to understand the limitations, we developed a scenario tree of the surveillance programme to describe the relationship between the living crow population and WNV test results of the laboratory at the Centre Québécois pour la santé des animaux sauvages (CQSAS; Quebec centre for wildlife health) (Figure 4) (Martin, Cameron et al. 2007). This figure describes the differences between  $P_{\text{positive/living crow}}$  (proportion of living crows that die and test positive for WNV under the surveillance system), and  $P_{\text{positive/reported carcasses}}$  (proportion of carcasses reported by the surveillance system that test positive for WNV). While both proportions have equivalent numerators ( $n_{\text{pos}}$  = number of carcasses that test positive for WNV under the surveillance system), the denominators are different. The denominator of  $P_{\text{positive/living crow}}$  corresponds to the entire living crow population in southern Quebec ( $n_{\text{tot}}$ ), whereas the denominator of  $P_{\text{positive/reported carcasses}}$  corresponds to the number of carcasses reported under the surveillance system that are tested at the lab ( $n_{\text{tested}}$ ). Thus,  $n_{\text{tested}}$  is a sample of  $n_{\text{tot}}$ , but how representative it is of the entire living crow population is not known.

An examination of the scenario tree reveals there are a number of key steps at which the representativeness of the sample could be compromised. The first situation involves age class mortality, which would affect what is termed “mortality rate” in Figure 4. The literature and our analysis show that mortality varies between age class

and within a specific age class throughout the summer (Good 1952; Chamberlain-Auger, Auger et al. 1990; Verbeek and Caffrey 2002). Therefore, the sample of dead crows used in our analysis may not be representative of the living crow population in terms of age class proportions. The second situation involves the probability of a carcass being identified by the surveillance system, or what is termed “surveillance system sensitivity” in the scenario tree. The surveillance system relies on voluntary phone calls (Vincent, Brown et al. 2003); consequently, the higher the human density, the higher the probability that a dead crow will be reported. Human densities are obviously higher in urban than non-urban areas. Therefore, the sample of dead crows may not accurately reflect the true population of dead crows: the number of dead crows reported in urban areas may be higher than in non-urban areas because of reporting bias. The third situation involves the sensitivity of the VecTest® used for determining the WNV status of carcasses. Error in this step could compromise the representativeness of the numerator in  $P_{\text{positive/reported carcasses}}$  or  $P_{\text{positive/living crow}}$ . The sensitivity of VecTest® has been measured at between 78.4% and 92.8%, which is less than ideal (Lindsay, Barker et al. 2003; Stone, Okoniewski et al. 2004; Stone, Therrien et al. 2005; Padgett, Cahoon-Young et al. 2006). The factors linked to variation in sensitivity are unknown, and these factors may have introduced a bias in the number of the false negative carcasses if these factors are associated with age or time interval, the test variables in our analysis.

The above observations also apply to differences between  $P_{\text{negative/living crow}}$  (proportion of living crows that die and test negative for WNV under the surveillance system) and  $P_{\text{negative/reported carcasses}}$  (proportion of carcasses reported by the surveillance system that test negative for WNV).

In conclusion, this work has enabled us to further explore and validate some of the risk factors shaping baseline mortality and mortality associated with WNV infection in crow populations. Age and time interval appear to be fundamental variables

determining baseline mortality. Plots of fluctuations in the frequency of WNV-positive carcasses recovered and the statistical analysis revealed that age and time interval were also strongly associated with positive WNV status of carcasses. Age appears to be a behavioral risk factor with different behaviors associated with different age classes. It is also an individual risk factor: younger birds suffer greater mortality but mortality that is not associated with WNV. The data from the Quebec surveillance programme for 2005 show that age and time interval interact with one another to create a complex, dynamic pattern of mortality. As discussed in this paper, if neither age nor time interval are considered in the surveillance data analysis, the WNV risk for crows and humans may be seriously misinterpreted. More generally, when using an animal as a sentinel in a surveillance system, we need to have an in-depth understanding of its behavior in order to avoid introducing biases when interpreting surveillance data.

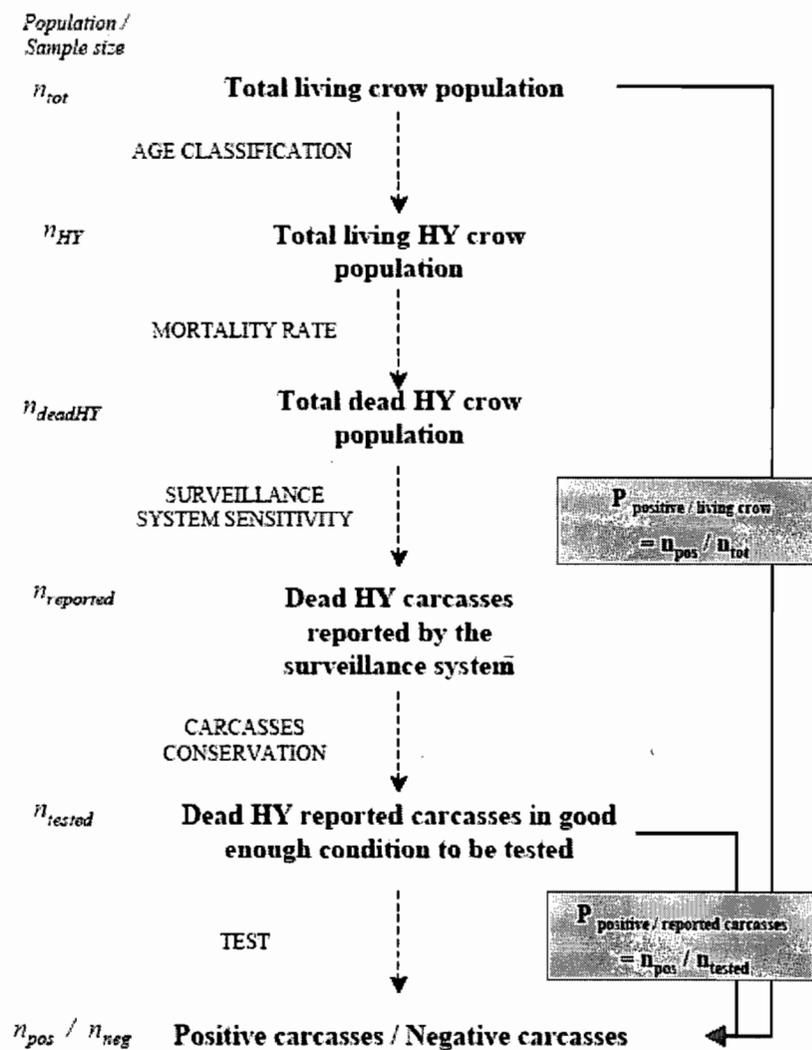


Figure 4: Scenario tree for the 2005 provincially run West Nile Virus surveillance programme in Quebec (example given for the hatching-year crow population).

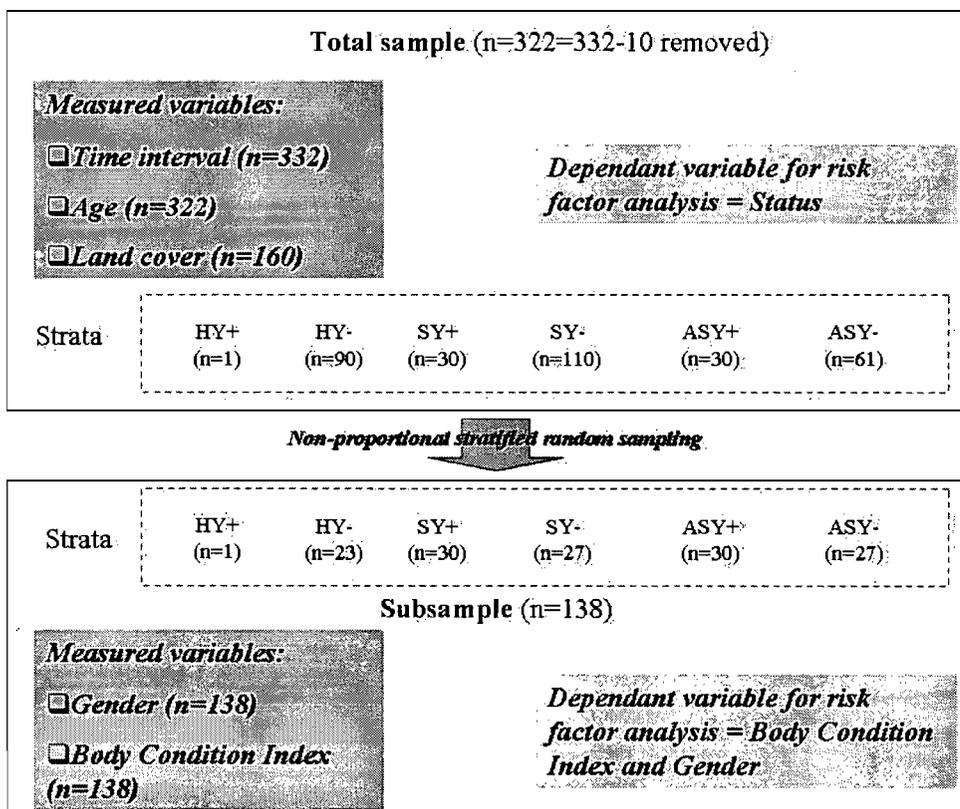


Figure 5 : Sampling protocol for risk factors analysis of the crow carcasses collected in southern Quebec in summer 2005.

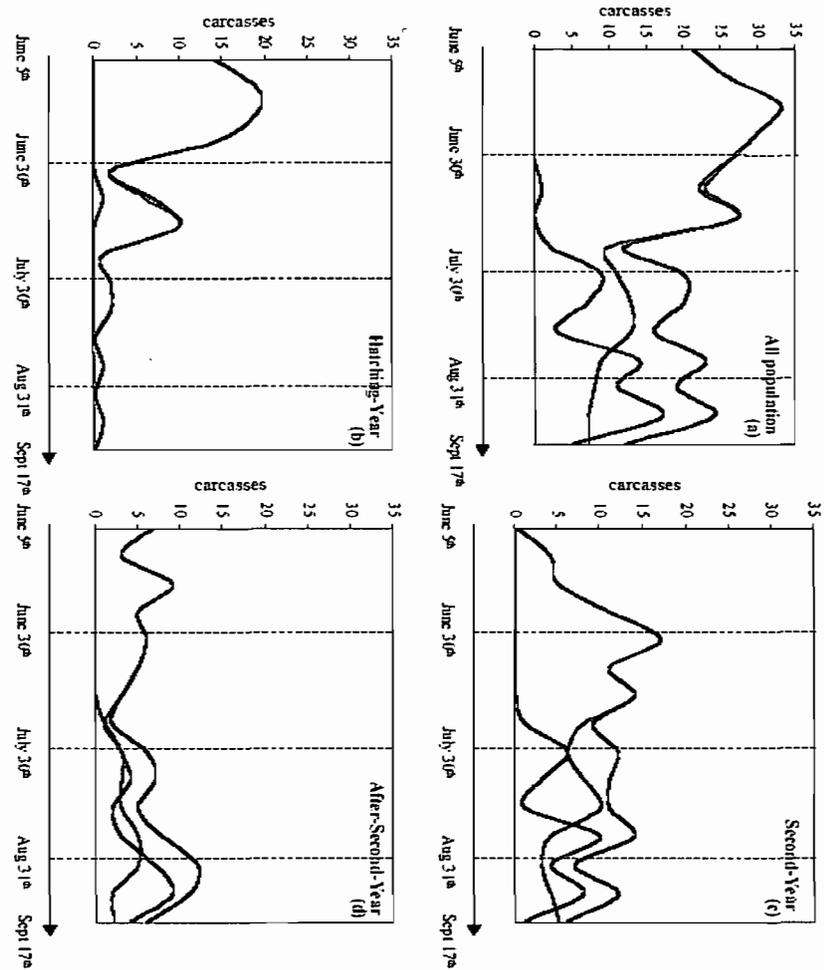


Figure 6: Temporal fluctuations in age specific crow mortality in summer 2005 based on data from the West Nile virus surveillance programme. The red line shows WNV-positive carcasses, the green line WNV-negative carcasses and the black line both WNV-positive and WNV-negative carcasses. The curves correspond to the weekly sum of negative and/or positive carcasses recovered. (a) All carcasses ( $n=332$ ), (b) Hatching-year carcasses ( $n=144$ ), (c) Second-year carcasses ( $n=96$ ), and (d) After-second-year carcasses ( $n=92$ ).

TIME INTERVALS 1 and 2					TIME INTERVALS 3 and 4				
Gender	Age group	Time interval	All carcasses	WNV-positive carcasses	Gender	Age group	Time interval	All carcasses	WNV-positive carcasses
<b>Male</b>	<b>HY</b>	1	14	0	<b>Male</b>	<b>HY</b>	3	1	1
		2	4	0			4	0	0
	<b>SY</b>	1	3	0		<b>SY</b>	3	22	14
		2	4	0			4	7	6
	<b>ASY</b>	1	5	0		<b>ASY</b>	3	9	5
		2	5	0			4	13	11
<b>Female</b>	<b>HY</b>	1	3	0	<b>Female</b>	<b>HY</b>	3	1	0
		2	1	0			4	0	0
	<b>SY</b>	1	1	0		<b>SY</b>	3	10	6
		2	5	0			4	5	4
	<b>ASY</b>	1	4	0		<b>ASY</b>	3	8	5
		2	1	0			4	12	9

Table IV: Frequency distribution of crow carcasses according to gender, age class and time interval. Numbers are given for all carcasses and for WNV-positive carcasses. Carcasses have been collected in southern Quebec in 2005.

	<b>Hatching year</b>		<b>Second year</b>		<b>After second year</b>		<b>tot</b>
	<b>WNV+</b>	<b>WNV-</b>	<b>WNV+</b>	<b>WNV-</b>	<b>WNV+</b>	<b>WNV-</b>	
<b>Urban land cover</b>	0	18	11	20	16	12	77
<b>Non-urban land cover</b>	1	18	16	24	7	17	83
<b>tot</b>	1	36	27	44	23	29	160

Table V: Frequency distribution of crow carcasses according to age class, WNV status and land cover (urban versus non-urban). Carcasses have been collected in southern Quebec in 2005.

<b>Variable</b>	<b><math>\beta</math></b>	<b>Std. Error</b>	<b>P-value</b>	<b>95% Wald CI</b>	<b>OR</b>
<i>Time Interval 3</i>	-0.8574	0.3563	0.0161	0.211,0.853	0.424
<i>Time Interval 4 (Ref.)</i>	0.00				1.000
<i>Intercept</i>	0.4520	0.2791	0.1054		

Table VI: Evaluation of time interval as a risk factor in the reduced logistic regression model for predicting positive WNV status. The full model included age (SY and ASY), time interval (3 and 4) and the interaction between age and time interval (n=139).

### *Acknowledgments*

We thank Stéphane Lair and the staff of the CQSAS lab in Saint-Hyacinthe (Quebec), especially Kathleen Brown, for giving us the opportunity to use the crow surveillance data. We thank Guy Beauchamp for his help in the statistical analysis and Stéphanie Brazeau at the Public Health Agency of Canada for her support in the spatial data analysis. This project was partly funded by the Public Health Agency of Canada.

### *Literature cited*

- Barker, I. and C. Massey (2007). West Nile virus mortality in Ontario crow population. University of Guelph. Personal communication.
- Barker, I. K. and G. D. Campbell (2003). West Nile infection in free-ranging and captive wild birds and mammals, Ontario, CANADA, 2002. Proceedings of the 52nd annual Wildlife Disease Association conference, Saskatoon, SASKATCHEWAN.
- Bell, J. A., C. M. Brewer, et al. (2006). "West Nile virus epizootiology, central Red River Valley, North Dakota and Minnesota, 2002-2005." *Emerging infectious diseases* 12(8): 1245-1247.
- Brown, K., N. Côté, et al. (2005). Surveillance, prévention et contrôle du virus du Nil occidental sur le territoire québécois, Rapport d'activités 2005. Ministère de l'agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec - Institut National de Santé Animale. 23 p.

- Brown, K. and A. Dallaire (2002). Surveillance pour la détection précoce de l'infection par le virus du Nil Occidental chez les oiseaux sauvages au Québec, Saison 2002, Centre Québécois sur la Santé des Animaux Sauvages - Département de pathologie et microbiologie - Faculté de Médecine Vétérinaire - Université de Montréal- Québec - CANADA: 62 p.
- Brown, M. E. (1997). Assessing body condition in birds. *Current Ornithology*. V. K. Nolan Jr., Ellen D. (Eds.) New York and London, Plenum Press. vol.13: 67-135.
- Caccamise, D. F., L. M. Reed, et al. (1997). "Roosting behavior and group territoriality in American crows." *The Auk* 114(4): 628-637.
- Caffrey, C. (1992). "Female-biased delayed dispersal and helping in American crows." *The Auk* 109(3): 609-19.
- Caffrey, C., T. J. Weston, et al. (2003). "High mortality among marked crows subsequent to arrival of West Nile virus." *Wildlife Society Bulletin* 31(3): 870-872.
- Chamberlain-Auger, J. A., P. J. Auger, et al. (1990). "Breeding biology of American crow." *Wilson Bulletin* 102(4): 615-622.
- DMTI\_Spatial (2005). CanMap Streetfile v2005.3 [computer file]. Markham, Ontario.
- Dohoo, I., W. Martin, et al. (2003). The logistic regression. *Veterinary Epidemiologic Research*. S. M. McPike. (Ed.) Charlottetown, Prince Edward Island, Canada: 335-372.

- Dohoo, I., W. Martin, et al. (2003). Modelling Count and Rate Data. Veterinary Epidemiologic Research. S.M. McPike (Ed.). Charlottetown, Prince Edward Island, Canada: pp391-409.
- Eidson, M., J. R. Miller, et al. (2001). "Dead crow densities and human cases of West Nile virus, New-York State, 2000." *Emerging Infectious Diseases* 7(4): 662-664.
- Emlen, J. T. J. (1942). "Notes on a nestling colony of western crows." *Bird Banding* 13(4): 143-154.
- Gangz, A. Y., I. K. Barker, et al. (2004). "West Nile Outbreak in North American Owls, Ontario, 2002." *Emerging Infectious Diseases* 10(12): 2135-2142.
- Gauthier, J. and Y. Aubry (1995). Corneille d'Amérique. Les oiseaux nicheurs du Québec - Atlas des oiseaux nicheurs du Québec méridional. Société québécoise de protection des oiseaux Association québécoise des groupes d'ornithologues, Service canadien de la Faune, Environnement Canada, Région du Québec Montréal (Canada): 726-729.
- Gibbs, S. E. J., A. B. Allison, et al. (2006). "West Nile virus antibodies in avian species of Georgia, USA: 2000-2004." *Vector borne and zoonotic diseases* 6(1): 57-72.
- Good, E. E. (1952). The life history of the American crow-*Corvus brachyrhynchos* Brehm, Ohio State University. Doctor of Philosophy degree: 188p.
- Johnson, G. D., M. Eidson, et al. (2006). "Geographic Prediction of Human Onset of West Nile Virus Using Dead Crow Clusters: An Evaluation of Year 2002 Data in New York State." *Am. J. Epidemiol.* 163(2): 171-180.

- Julian, K. G., M. Eidson, et al. (2002). "Early season crow mortality as a sentinel for West Nile virus disease in Humans, Northeastern United States." *Vector Borne and Zoonotic Diseases* 2(3): 145-155.
- Kilham, L. (1984). "Cooperative breeding of American crows." *Journal of Field Ornithology* 55(3): 349-356.
- Komar, N. (2001). "West Nile virus surveillance using Sentinel Birds." *Annals of the New York Academy of Sciences* 951: 58-73.
- Komar, N., S. Langevin, et al. (2003). "Experimental infection of North American birds with the New York 1999 Strain of West Nile Virus." *Emerging Infectious Diseases* 9(3): 311-322.
- Kulasekera, V. L., L. Kramer, et al. (2001). "West Nile virus infection in Mosquitoes, Birds, Horses and Humans, Staten Island, New York, 2000." *Emerging Infectious Diseases* 7(4): 722-725.
- Lindsay, R., I. Barker, et al. (2003). "Rapid antigen-capture assay to detect West Nile virus in dead corvids." *Emerging Infectious Diseases* 9(11): 1406-1410.
- Ludwig, G. V., P. P. Calle, et al. (2002). "An outbreak of West Nile virus in a New York City captive wildlife population." *Am J Trop Med Hyg* 67(1): 67-75.
- Marfin, A. A., L. R. Petersen, et al. (2001). "Widespread West Nile Virus Activity, Eastern United States, 2000." *Emerging Infectious Diseases* 7(4): 730-735.

- Martin, P. A. J., A. R. Cameron, et al. (2007). "Demonstrating freedom from disease using multiple complex data sources 1: A new methodology based on scenario trees." *Preventive Veterinary Medicine* 79: 71-97.
- Marzluff, J. M., R. Bowman, et al. (2001). A historical perspective on urban bird research: trends, terms, and approaches. *Avian ecology and conservation in an urbanizing world*. J.M. Marzluff, Bowman R. and R. Donnely (Eds.). Norwell, MA, Kluwer Academic Press: 1-17.
- Marzluff, J. M., K. J. McGowan, et al. (2001). Causes and consequences of expanding American Crow population. *Avian ecology and conservation in an urbanizing world*. J.M. Marzluff, Bowman R. and R. Donnely (Eds.). Norwell, MA, Kluwer Academic Press: 331-363.
- Marzluff, J. M. and E. Neatherlin (2006). "Corvid response to human settlements and campgrounds: Causes, consequences, and challenges for conservation." *Biological Conservation* 130(2): 301-314.
- Mather, A. E., D. J. Mellor, et al. (2007). Data sparsity and separation in multidimensional covariate space: approaches to a common epidemiological problem. *Proceedings of the society for veterinary epidemiology and preventive medicine*, Dipoli, Helsinki/Espoo, Finland.
- McGowan, K. J. (2001). Demographic and behavioral comparisons of suburban and rural American Crows. *Avian ecology and conservation in an urbanizing world*. J.M. Marzluff, Bowman R. and R. Donnely (Eds.). Norwell, MA, Kluwer Academic Press: 365-381.

- McLean, R. G., S. R. Ubico, et al. (2002). "West Nile virus in Livestock and Wildlife." *Current topics in microbiology and immunology* 267: 271-308.
- McLean, R. G., S. R. Ubico, et al. (2001). "West Nile virus transmission and ecology in birds." *Annals New York Academy of Sciences* 951: 54-7.
- Meulen, K. M. v. d., M. B. Pensaert, et al. (2005). "West Nile virus in the vertebrate world." *Archives of Virology* V150(4): 637-657.
- Padgett, K. A., B. Cahoon-Young, et al. (2006). "Field and Laboratory Evaluation of Diagnostic Assays for Detecting West Nile Virus in Oropharyngeal Swabs from California Wild Birds." *Vector-Borne and Zoonotic Diseases* 6(2): 183-191.
- Public Health Agency of Canada (2001). *Actualités en bref pour les maladies infectieuses: bulletin du 24 août 2001 (en ligne)*.
- Public Health Agency of Canada (2004). "Bilan de la Surveillance des infections humaines par le virus du Nil Occidental au Québec, 2003." *Canada Communicable Disease Report* 30(11): 97-108.
- Public Health Agency of Canada. (2007). "West Nile virus." 2007, from [http://www.phac-aspc.gc.ca/wnv-vwn/index\\_f.html](http://www.phac-aspc.gc.ca/wnv-vwn/index_f.html).
- Pyle, P. (1997). *Identification guide to North American birds, Part I. Slate Creek, Bolina, California, USA*.
- Ringia, A. M., B. J. Blitvich, et al. (2004). "Antibody prevalence of West Nile virus in Birds, Illinois, 2002." *Emerging Infectious Diseases* 10(6): 1120-1124.

- Savoie, C., C. P., et al. (2005). Cartes d'utilisation du sol à partir des images classifiées Landsat-5 et Landsat-7 du territoire agricole du Québec, 1996-2002. Ministère de l'agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.
- Stone, W. B., J. C. Okoniewski, et al. (2004). "VecTest as diagnostic and surveillance tool for West Nile virus in dead birds." *Emerging Infectious Diseases* 10(12): 2175-2181.
- Stone, W. B., J. E. Therrien, et al. (2005). "Assays to Detect West Nile Virus in Dead Birds." *Emerging Infectious Diseases* 11(11): 1770-1773.
- Stouffer, P. C. and D. F. Caccamise (1991). "Roosting and diurnal movements of radio-tagged American crows." *Wilson Bulletin* 103(3): 387-400.
- Theophilides, C. N., S. C. Ahearn, et al. (2003). "Identifying West Nile virus areas: the dynamic continuous-area Space-Time system." *American Journal of Epidemiology* 157: 843-854.
- Verbeek, N. A. M. and C. Caffrey (2002). American crow (*Corvus brachyrhynchos*) - Account Nb647. The birds of North America. A. Poole and E. Gill Editors. Academy of Natural Sciences, Philadelphia, Pennsylvania, and American Ornithologists' Union, Washington, D.C., USA.
- Vincent, C. and K. Brown (2004). Surveillance, prévention et contrôle du virus du Nil occidental sur le territoire québécois, Rapport d'activités, Année 2004, Ministère de l'agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec - Institut National de Santé Animale: 21 p.

- Vincent, C., K. Brown, et al. (2003). Surveillance, prévention et contrôle du virus du Nil occidental sur le territoire québécois, Rapport d'activités, Année 2003, Ministère de l'agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec - Institut National de Santé Animale: 48pp.
- Ward, M. R., D. E. Stallknecht, et al. (2006). "Wild bird mortality and West Nile virus surveillance: biases associated with detection, reporting, and carcass persistence." *Journal of Wildlife Diseases* 42(1): 92-106.
- Watson, J. T., R. C. Jones, et al. (2004). "Dead crow reports and location of human West Nile virus cases, Chicago, 2002." *Emerging Infectious Diseases* 10(5): 938-940.
- Withey, J. C. and J. M. Marzluff (2005). "Dispersal by juvenile American crows (*Corvus brachyrhynchos*) influences population dynamics across a gradient of urbanization." *The Auk* 122(1): 205-221.
- Yaremych, S. A., J. M. Levenson, et al. (2004). "Gender determination and lack of sex-specific West Nile virus mortality in American crows." *Wildlife Society Bulletin* 32(3): 893-9.
- Yaremych, S. A., R. J. Novak, et al. (2004). "Home range and habitat use by American crows in relation to transmission of west nile virus." *Wilson Bulletin* 116(3): 232-239.

## **Article 3**

# **The analysis of crow population dynamics as a surveillance tool**

Antoinette Ludwig, Michel Bigras-Poulin, Pascal Michel

Preventive Veterinary Medicine

(soumis)

### ***Abstract***

West Nile virus (WNV) infection, a zoonotic disease for which birds act as a reservoir, first appeared in North America in August 1999. It was first reported in Quebec in 2002. The Quebec surveillance system for WNV has several components, including the surveillance of mortality in corvid populations, which includes the American crow (*Corvus brachyrhynchos*). The main objectives of this study are to better understand the population dynamics of this species in Quebec and to evaluate the impact of WNV on it. We obtained observation data for living crows in this province for the period of 1990 to 2005 and then conducted a spectral analysis of these data. To study changes in crow population dynamics the analysis was carried out before and after the appearance of WNV and space was divided in two different areas (urban and non-urban). Our results show the importance of cyclical phenomena in the normal population dynamics of the species: cycles with periods of less than 1 year in non-urban areas and cycles with periods of greater than 1 year in urban areas. We obtained expected fluctuations in bird densities using an algorithm derived from spectral decomposition. When we compared these predictions with data observed after 2002, we found marked perturbations in population dynamics beginning in 2003 and lasting up to 2005. In the discussion, we present various hypotheses based on the behavior of the American crow to explain the normal population dynamics observed in this species and the effect of type of area (urban versus non-urban). We also discuss how the predictive algorithm could be used as a disease surveillance tool and as a measure of the impact of a disease on wild fauna.

Keywords: American crow, population dynamics, wildlife surveillance, West Nile virus, spectral analysis

## ***Introduction***

The American crow (*Corvus brachyrhynchos*), a member of the Passeriformes order, is present in large densities in North America [19]. Its large size and association with humans mean it can be easily observed by birdwatchers from organizations like the *Association québécoise des groupes d'ornithologues* or Quebec Association of Birdwatchers, whose data we used in this study.<sup>3</sup> The literature on the biology of the American crow documents the very particular population dynamics of this species, specifically the role of urbanization in determining inter- and intra-seasonal migratory movements. It has been shown that non-urban areas are frequented by these crows throughout the year, but especially in the spring for reproduction, late summer and fall during seasonal migrations, and winter for communal roosting at night [15, 19, 25]. Urban areas are frequented less regularly throughout the year than are non-urban areas. For the crow, the city constitutes a vast reservoir of readily available food [14]. It is exploited by inexperienced young birds, who leave their family territories and travel to urban areas in late summer to early fall [13, 24]. Urban areas are also frequented during the day in winter by all age classes because food is more available here than in the snow-covered countryside [23].

After the West Nile virus (WNV) first appeared in North America in September 1999 [11], significant mortality associated with WNV was observed in crow populations in

---

<sup>3</sup> Cyr A., Étude des populations d'oiseaux du Québec (EPOQ), Oiseaux du Québec – Bird Studies Canada. (1995) June 8, 2007.

various regions throughout the United States [9]. To date, there have been no studies to evaluate the impact of WNV on this species in Quebec.

The objectives of this study are to: 1) describe the normal population dynamics of the American crow in Quebec based on observations of living birds, and 2) determine whether these population dynamics changed following the appearance of WNV in North America in 1999.

### ***Materials and Methods***

#### **Preparation of observation data**

We used census data for crows compiled in the EPOQ databank (*Étude des populations d'oiseaux du Québec*, or Studies of Bird Populations in Quebec)<sup>4</sup> for the years 1990 to 2005. These data are derived from counts of crows throughout Quebec by members of the *Association québécoise des groupes d'ornithologues* or Quebec Association of Birdwatchers. These data are obtained through opportunistic sampling. At each outing, the birdwatcher fills out two types of documents: one “cover sheet” and one or more documents comprising a “record”. The cover sheet lists one location and one date. The record notes each species observed during the outing, the number of individuals observed for each species and the duration of the observation. The site is coded by a unique number corresponding to the geographical centroid of a cell measuring 1.3 km x 1.9 km in a grid covering the province of Quebec. Due to the greater density of

---

<sup>4</sup> Cyr A., *Étude des populations d'oiseaux du Québec (EPOQ)*, Oiseaux du Québec - Bird Studies Canada. (1995) June 8, 2007.

observations in southern Quebec, we decided to limit our study area to a rectangular area measuring approximately 100 km x 130 km and bordered on the north by Lac-Saint-Pierre on the St. Lawrence River, on the south by the Quebec–US border, on the west by the Quebec–Ontario border, and on the east by the city of Granby, Quebec (46°6'N; 45°0'N; 72°17'W; 74°2'W).

We classified each EPOQ cell in our study area as either urban or non-urban, a dichotomy inspired by previous work on the impact of urbanization on the American crow [12]. We used CanMap Streetfiles<sup>5</sup> and LandSat<sup>6</sup> to obtain spatial land use data. For the purposes of this study, we classified an area as urban if it is designated as commercial, government, institutional, residential or industrial in CanMap, or as urban in LandSat. We classified open areas, parks and waterbodies in CanMap, and agricultural areas, forests, wetlands in LandSat, as non-urban. We only used the less-precise LandSat data when CanMap data were not available for a given EPOQ cell. For each cell, we calculated the surface area covered by each of the two types of areas and then classified the cell according to the predominant type present. The spatial analysis was performed using ArcGIS.<sup>7</sup>

---

<sup>5</sup> DMTI\_Spatial, CanMap Streetfile v2005.3 [computer file]. Markham, Ontario, (2005).

<sup>6</sup> Savoie C., P. C., Brière D., Cartes d'utilisation du sol à partir des images classifiées Landsat-5 et Landsat-7 du territoire agricole du Québec, 1996-2002. Ministère de l'agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, (2005).

<sup>7</sup> ESRI, ArcGIS Desktop 9.2, (2006).

### **Analysis of normal population dynamics**

The EPOQ data used in this analysis are from 1990 to 1998 inclusive, that is before the arrival of WNV in North America [11]. To achieve acceptable precision in the estimates of observation densities provided by the EPOQ data, we calculated the total number of cover sheets and the total number of records for the two types of areas and for each month. These density estimates will be called, respectively, “cover sheet monthly density” and “record monthly density.” In the following analyses, we examined the urban and non-urban areas separately. For each type of area, we modeled the record monthly densities using a generalized linear regression model with a negative binomial distribution, with record monthly density as a dependent variable, year as an independent variable, cover sheet monthly density as an offset and site (unique code for the EPOQ cell) as a random factor. We included this random factor in the model in order to take into account any autocorrelation between observations made at the same site during the same month. The corrected record monthly densities were Pearson residuals from the regression model. To study fluctuations for the period 1990 to 1998, we plotted the time series for each type of area for cover sheet monthly densities as well as both corrected and uncorrected record monthly densities.

We analyzed the time series of corrected record monthly densities for each type of area using Fourier spectral analysis, which breaks down a time series into a number of component spectra that are a function of the length of the series [10]. A spectrum is a periodic mathematical function in which the sum of simple waves are mathematically

represented by sines and cosines [10]. We constructed a periodogram for each series in order to visualize the amplitudes ( $J_k$ ) of the spectra [18]. For each spectrum, we calculated the Fisher statistic [22] and then selected all statistically significant spectra based on  $p \leq 5\%$ . The parameters of these spectra were used to create a predicted time series for each type of area, allowing us to observe visually the result of summing the different retained spectra.

To quantify the contribution of each spectrum resulting from the Fourier decomposition to the total variance of the time series and to find a threshold in changes of this contribution, we first ranked the 54 spectra in order of decreasing amplitude (ranks 1 to 54). We then calculated, in succession, 54 time series in the following manner: for the first series we included only the parameters of the spectrum ranked 1, for the second series we included the parameters of the spectra ranked 1 and 2, for the third series we included the parameters of the spectra ranked 1, 2 and 3, and so forth. We then repeated the process until all 54 spectra had been included in the calculations. For each of the 54 series, we calculated the value of S (deviation), the sum of squares of the differences between observed values (corrected record densities) and predicted values (calculated values) for the entire simulated series.

For the regression analysis, we used PROC GENMOD in SAS.<sup>8</sup> The spectral analysis and construction of periodograms was done using PROC SPECTRA in SAS.<sup>8</sup> We used

---

<sup>8</sup> SAS\_Institute\_inc., SAS version 9.1, (2007).

Excel<sup>9</sup> to run Fisher tests and to create the predicted time series. Finally, we calculated S values by creating a programme in SAS.<sup>8</sup>

### **Surveillance of perturbations in population dynamics**

For this analysis, we used EPOQ data for the period 1990 to 2005. These data were also corrected for year, number of cover sheets and sites using a generalized linear regression model with a negative binomial distribution.

Our methodology was based on an algorithm developed by Farrington to detect perturbations in a time series [7]. According to this author, a predictive algorithm is developed on a time series of case densities (temporal window) over N units of time. The expected value for time N+1 (increment) is then calculated from the algorithm and compared to the observed data. A perturbation is marked when the observed value differ from the expected value at time N+1 (prediction). As long as no perturbation is present, the analysis is reiterated by moving the temporal window by one unit. For our study, we adapted this concept by defining a perturbation as a change in the temporal pattern of residual values (differences between observed and predicted values) for the year extrapolated, taking the extrapolated year 1999 as the reference (see below) and by setting the time increment as one year.

To detect perturbations in the time series of EPOQ data, we used an algorithm based on the spectral decomposition of nine consecutive years of EPOQ data (predictive years). To identify what spectra to include in the algorithm, and for which the sum must explain

---

<sup>9</sup> Microsoft, Microsoft Office Excel, (2003).

at least 85% of the total variance of the observed series, we used the deviations (S) for each cumulated series of spectra. We were then able to use this series of spectra to calculate the expected values for a 10th extrapolated year. We then compared these to the observed data by calculating the standardized residual values based on the nine predictive years. We repeated the same steps for the other temporal windows of 10 consecutive years (nine predictive years plus one extrapolated year) starting in 1990 and by increment of one year, until a perturbation was detected.

We used also the same methodology to evaluate the impact of perturbations on the long-term dynamics of the EPOQ data. For each type of area (urban and non-urban), we used 12 years of data (1990 to 2001) to construct an algorithm from the spectral analysis that represented 85% of the variance observed. This algorithm was used to calculate a series of standardized residuals based on the 12 predictive years for the 4 following consecutive extrapolated years that is 2002 to 2005.

We created programmes in SAS<sup>10</sup> and Excel<sup>11</sup> to perform these analyses.

## ***Results***

### **Normal population dynamics**

The number of cover sheets produced by birdwatchers was not constant throughout the year. For both urban and non-urban areas, more cover sheets were produced during spring (April and May) and early winter (December and January) than at other times of

---

<sup>10</sup> SAS\_Institute\_inc., SAS version 9.1, (2007).

<sup>11</sup> Microsoft, Microsoft Office Excel, (2003).

the year. Fewer cover sheets were produced in the summer months of June, July and August, and in November.

Temporal fluctuations in record monthly densities, both uncorrected and corrected for number of cover sheets, were similar. The major effect of the correction was a decrease in the amplitude of the corrected series. For non-urban areas, the amplitude of the corrected series was 96.93, while for the uncorrected series it was 2561. For urban areas, the amplitude was 178.97 for the corrected series and 11,232 for the uncorrected series. In non-urban areas, the fluctuations were characterized by a high amplitude peak in spring plus two additional peaks in summer and late fall that were less consistently present. By contrast, in urban areas, the fluctuations were characterized by a very strong annual cycle that every year generated high densities during the winter months. At other times of the year, densities were low in urban areas. In addition to the annual fluctuations observed in urban areas, we found higher amplitude peaks at months 12, 84 and 132 in the time series.

The periodograms for the two areas were very different. For non-urban areas, we observed a significant annual cycle (12 months and 13.5 months) and other significant spectra (based on amplitude) with periods of less than 12 months (2.84, 4, 3.72 and 6 months). We also found a significant annual cycle (12 months) in urban areas. All the other significant spectra based on amplitude had periods of greater than 12 months (36, 18 and 21.6 months). Based on the Fisher test, the statistically significant spectra for non-urban areas were those with periods of 2.84, 12 and 4 months and, for urban areas,

those with periods of 12, 36, 18 and 21.6 months (Table VII). Figure 7 shows the predicted time series for each type of area based on the spectra found to be statistically significant by the Fisher test. For non-urban areas, we can see significant intra-annual fluctuations. The peaks that were the most stable in amplitude and date of occurrence were found in spring (March, April and May) and early summer (June and July). A less stable peak occurred in the fall (September and October). Its amplitude was often higher than that of the spring and summer peaks, but its exact timing seemed to shift slightly from year to year, that is the maximum of the peak may have occurred in September one year and then in October the next. In urban areas, we see that intra-annual fluctuations were not very large. The maximum densities were found during the winter months (December and January), but this varied from year to year: a winter with high densities was preceded and followed by two winters of low densities, meaning there was a 36-month cycle. Note also that the spectra with periods of 18 months and 21.6 months had little or no effect on this pattern.

An examination of changes in  $S$  (deviation) of a predicted series using cumulated spectra based on rank shows that for both urban and non-urban areas,  $S$  decreased as the number of cumulated spectra increased in a regular decreasing exponential fashion with no obvious threshold. When all of the spectra were included, the value of  $S$  was zero. The threshold beyond which 85% of the variance of the series was explained is situated at 29 cumulated spectra for the urban area, and 30 cumulated spectra for the non-urban area.

### **Surveillance of perturbations in population dynamics**

For all analyses, approximately one-half of the spectra produced by the Fourier decomposition were needed to achieve a value of 85% for percentage of variance in the observed series explained by the predicted series based on S values.

For all analyses, the standardized residual values for the predictive years consistently fell between  $-2$  and  $2$  (Figures 8, 9 and 10). The behavior of the standardized residual values for the extrapolated years was similar for 1999 to 2002 inclusively (Figure 8 shows the sequence 1993 to 2002). This pattern is characterized by a peak in spring for non-urban areas, and a peak in winter for urban areas. There is also a smaller peak in the winter for non-urban areas (extrapolated years 1999 and 2001). In other words, from 1999 to 2002, the predictive algorithm tended to systematically underestimate the observed values (positive residual values) for spring in non-urban areas and for winter in urban areas. For the extrapolated year 2003, the behavior of standardized residual values changed, signifying the presence of perturbations (Figure 9). There was no longer a peak in spring for non-urban areas, and the peak normally observed for winter in urban areas had been replaced by a very pronounced trough. In other words, in 2003 the predictive algorithm tended to overestimate the observed values for crow densities in winter but accurately estimated crow densities in spring.

Figure 10 shows the impact of the perturbations on several successive extrapolated years. The dynamics of residual values for 2002 are similar to that seen in Figure 8. The dynamics of calculated residual values for 2003 in Figure 10 differ slightly from what is

seen in Figure 9: the spring peak has disappeared and has been replaced by a trough in both urban and non-urban areas, and the winter peak has been replaced by a trough in urban areas. Changes in the observed residual values for the extrapolated years 2004 and 2005 are similar to those observed for 2003: the residual values form a trough rather than a peak during the winter, but this depression is less pronounced than in 2003. Beginning in 2004, the spring peak observed in 2002 is seen again in the residual values, although it is lower in amplitude than it was in spring 2002. In other words, while for 2002 the predictive algorithm tended to underestimate densities for both the spring in non-urban areas and the winter in urban areas, it strongly overestimated them for spring 2003 in both urban and non-urban areas, and for winter in urban areas. From 2004 onwards, the predictive algorithm tended to again underestimate observed densities in spring for non-urban areas as in 2002, but still slightly overestimated densities in winter for urban areas as in 2003. Hence, we see a lessening of the perturbations.

## ***Discussion***

### **Preparation of the bird census data**

The quality of data obtained from bird count databanks like the EPOQ depends on both the precision and accuracy of the data [17]. To increase precision, sample size must be increased. As the EPOQ data were obtained through opportunistic sampling, we had no way of increasing the quantity of data collected. We were able to aggregate our data spatially (urban and non-urban areas) and temporally (month). This spatial

aggregation was based on features related to the biology of the American crow [12].

When determining the scale of temporal aggregation, we sought a level of precision that would give us a time step short enough to be able to carry out a spectral analysis and study variation in the data based on the biology of the crow [12, 19], yet long enough to have at least one cover sheet for each time step.

### **Normal population dynamics**

The normal dynamics of crow populations varies considerably between urban and non-urban areas (Table VII). This result coincides with information available in the literature. The finding of high crow densities in non-urban areas fits with observed crow behavior: crows frequent non-urban areas chiefly in spring in order to reproduce and in late summer and fall with migratory flocks [19, 25]. However, the EPOQ data did not show the high winter densities of crows in non-urban areas that are associated with communal roosting at night [16], probably because these aggregations occur at a time when birdwatchers are not usually observing birds. In urban areas, the peak in crow density in winter corresponds to birds foraging during the day in the only areas where food is available to them (Figure 7) [19]. We did not find the expected second peak in densities in urban areas during mid-to-late summer, probably because records for this part of the year are so sparse. Therefore, with the exception of summer in urban areas, the EPOQ data in conjunction with the spectral analysis constitute valid observational data that can be used to monitor fluctuations in crow densities in both urban and non-urban areas.

Crow populations in Quebec appear to fluctuate according to a multi-year cycle. This is only seen in urban areas and is represented by a spectrum with a period of 36 months. (Table VII). The spectra with periods of 18 and 21.6 months only occur to adjust the height of peaks in “intermediary” years, that are the two years between the peaks situated at either end of the 3-year cycle (Figure 7). The existence of a 3-year spectrum in the population dynamics of crows is very unexpected. However, a visual examination of the observed series for urban areas (Figure 7) would suggest that the 3-year spectrum could be the result of a 6-year cycle broken into two parts. As we had only 9 years of data available for our analysis, we could only use a maximum spectral period of 4.5 years for our spectral analysis. This 3-year cycle could be linked to the average age at which crows reach sexual maturity (3 to 5 years) or to other density-dependent factors regulating crow densities [6, 19]. A 6-year cycle could be related to the mean life expectancy of the bird [8, 19]. While our current state of knowledge does not allow us to conclude whether the cycle lasts 3 or 6 years, we can conclude with certainty that there are multi-year fluctuations in crow densities.

### **Surveillance of perturbations in population dynamics**

In this study, we used Fourier spectral decomposition to create a predictive surveillance algorithm of a time series with a strong harmonic component in an attempt to separate the deterministic component from the stochastic component generating noise in the time series [2]. Given the decreasing exponential function for deviance, we were not able to identify a clear threshold above which the residual variance would correspond to noise.

However, the curve for deviance showed us that a significant portion of the total variance would not be taken into account if only the spectra found to be statistically significant based on the Fisher test were used in the predictive algorithm. To optimize the adjustment of our predictive algorithm and to take into account a maximum amount of the deterministic component in the model without having to worry about including part of the stochastic component, we arbitrarily decided to retain in our predictive algorithm the spectra encompassing 85% of the total variance of the time series based on the deviance function.

For the four extrapolated years before the perturbations, that is 1999, 2000, 2001 and 2002, the predictive surveillance algorithm seems to be correctly adjusted to the observed data as the standardized residual values oscillate between  $-2$  and  $+2$  with the exception of two peaks systematically found in spring for non-urban areas, and in winter for urban areas (Figure 8). These two peaks correspond to the start and end points of the period during which we see the largest aggregations of crows. In winter and early spring, crows move about in groups of several dozens of individuals: foraging groups in winter and migratory groups in spring [19]. Winter foraging groups frequent urban areas where the food is easily found because it is not buried under the snow, while spring migratory flocks prefer non-urban environments where there are trees for perching and available food [19]. The finding that residual values are similar for extrapolated years between 1999 and 2002 makes us confident in our definition of perturbation as well as our

selection of a 85% threshold in the deviance curve to use in constructing our predictive algorithm.

Subsequent to the extrapolated year 2003 (Figure 9), the spring peak expected for non-urban areas changed and a pronounced trough was observed in winter. The winter peak also completely disappeared for urban areas. It is therefore very clear that crow populations in southern Quebec experienced major perturbations in 2003, both in urban and non-urban areas. These perturbations appeared six months after the arrival of WNV in Quebec in the summer of 2002 [4]. Despite this delay, these perturbations could correspond to a major mortality in crow populations due to WNV. This is because in crow populations the consequences of a major die-off at the end of the summer would only show up the following year in the EPOQ data, as there are few records for the summer and therefore the precision of summer crow density estimates is weaker. Furthermore, most of the individuals present in a region in the summer would also be present in that region the following spring [19], but not the following winter as some crows migrate south [8]. Even if our analysis of the EPOQ data does not allow us to attribute, with full certainty, the perturbations observed in 2003 to WNV, a causal relationship between these events is strongly suspected.

The Quebec government's WNV surveillance system based on monitoring crow mortality was implemented in 2001 [3]. This system can link crow mortality to the virus and actually detected the appearance of WNV in Quebec 6 months before what our model predicted. In addition, our analyses do not allow us to causally link the

perturbations observed in 2003 to WNV. While the appearance of WNV was expected in Quebec, this is not always the case, and our method has the important advantage of using data that is not only generated year round, but also abundant and free because it is collected by birdwatchers on a voluntary basis.<sup>12</sup> The data analysis is also not costly since only collaboration between epidemiologists and birdwatchers is needed. Our study proposes a method for monitoring wild populations that is rapid and simple, one that could be used in first-line surveillance to identify perturbations in population dynamics, the causes of which could then be elucidated by a more specific diagnostic process. In the analysis of the long-term impact of WNV (Figure 10), the perturbations observed in 2003 seemed to recur in the extrapolated years 2004 and 2005, although to a lesser degree. This leads us to conclude that the major perturbations in crow densities occurred in 2003, and that starting in 2004 the perturbations gradually disappeared and the normal dynamics returned. Assuming that the perturbations observed in 2003 were caused by WNV infecting crow populations, the phenomenon of a gradual recovery of the normal dynamics observed during the years 2003, 2004 and 2005 points to the resilience of crow populations to a virus that was still circulating in southern Quebec at this time [5, 21, 20]. A species' resilience in the face of disease is linked to a number of different factors, including the balance between morbidity and mortality due to the disease, individual exposure rates and reproductive rate [1, 9]. In the case of crow populations in southern Quebec, several factors are suspected, including a decrease in infection

---

<sup>12</sup> Cyr A., *Étude des populations d'oiseaux du Québec (EPOQ)*, Oiseaux du Québec - Bird Studies Canada. (1995) June, 8th 2007.

pressure caused by, for example, a decrease in the quantity of the vector, and the adaptation of the crows to the virus. The latter could be due to a decrease in the overall sensitivity of crow populations to the virus through a gradual, naturally occurring vaccination process, or by individuals that are less sensitive to the virus being favored by natural selection and then benefiting from an increase in their reproductive capacity. To date, there have been no studies to explore the exact nature and relative importance of these different phenomena. However, age-specific mortality linked to WNV has been observed in Quebec and Ontario: adult crows make up a greater proportion of retrieved carcasses than do young crows [5].<sup>13</sup> This observation suggests that the suspected resilience of crows in southern Quebec may be linked to the survival of young crows that reproduce sooner after the passage of WNV.

This study shows the validity of using EPOQ data in conjunction with spectral analysis to generate data for use in monitoring bird populations and determining the population dynamics of these populations. As described in the literature for other crow populations in North America, the degree of urbanization, appears to play a crucial role in these population dynamics as the cycles making up these dynamics vary depending on whether the area is urban or non-urban. This study also shows that this type of analysis holds great promise as a tool for disease surveillance in wild populations and for the evaluation of the impact of a disease on these populations. The limitation of this methodology is that it does not allow for the identification of a clear threshold beyond

---

<sup>13</sup> Barker I., Massey C., West Nile virus mortality in Ontario crow populations, personal communication (2007).

which the predictive algorithm would include all the deterministic components of the time series and exclude noise. To extend this work and to improve the sensitivity of the procedure, we suggest using a mathematical model that is capable of reproducing the behavior of crow populations and the dynamics of WNV circulation in these populations.

Type of area	Period	Amplitude	Phase	F statistic
Urban	12	12664.02	0.35	8.43(***)
	36	9818.47	1.16	6.33(***)
	18	8527.44	-1.07	5.03(***)
	21.6	6337.62	1.04	3.00(**)
Non-urban	2.84	1439.82	0.89	3.57(**)
	12	1336.33	0.86	3.29(**)
	4	1221.12	-0.32	2.99(**)
	3.72	1137.99	0.51	2.78(*)
	13.5	1104.19	-0.90	2.69(*)
	6	1024.49	0.97	2.49(*)

Table VII: F statistics for the statistically significant spectra for urban and non-urban areas. The period is given in months and the phase in radians. \* p-value of between 0.10 and 0.05. \*\* p-value of between 0.05 and 0.001. \*\*\* p-value of less than 0.001.

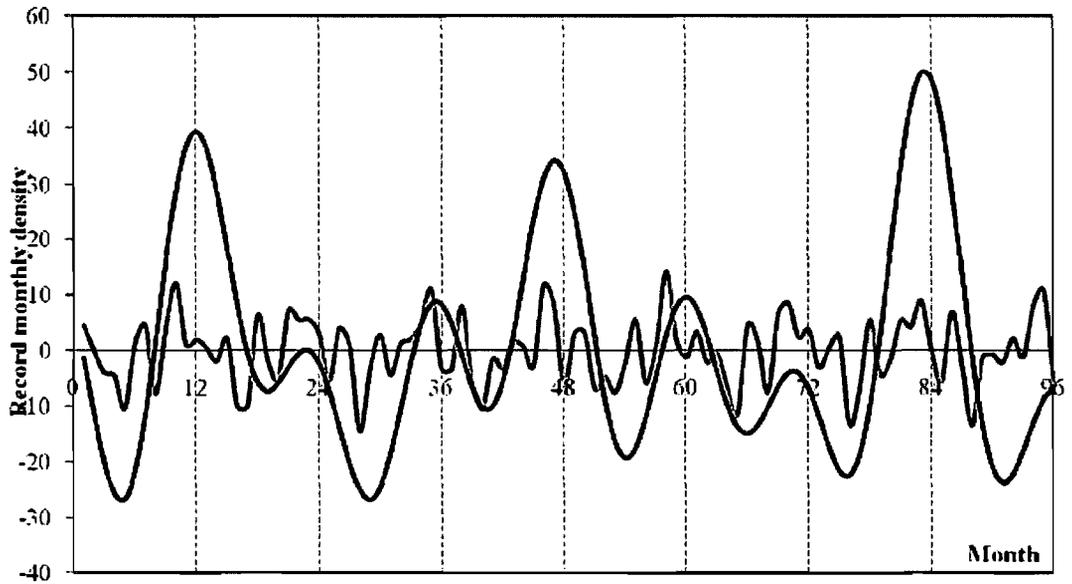


Figure 7: Predicted time series of record monthly crow density presented as residuals from a negative binomial models correcting for effect of year, intensity of observation and repeated site visits. The series is constructed based on statistically significant spectra according to the Fisher test. Green=non-urban areas; Gray=urban areas.

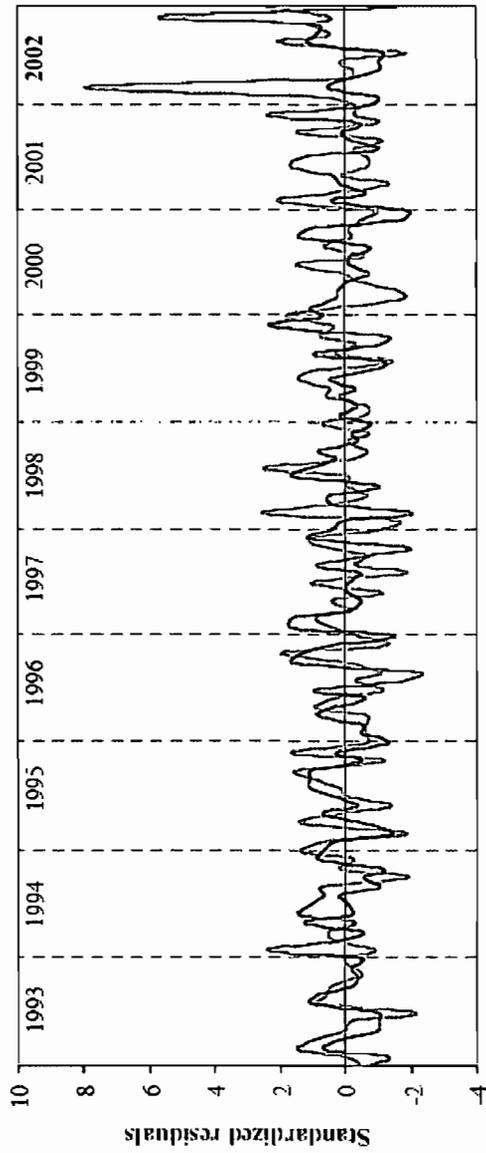


Figure 8: Changes in standardized residuals between 1993 and 2002 for non-urban areas (green) and urban areas (gray) with 2002 extrapolated for the American crow population.

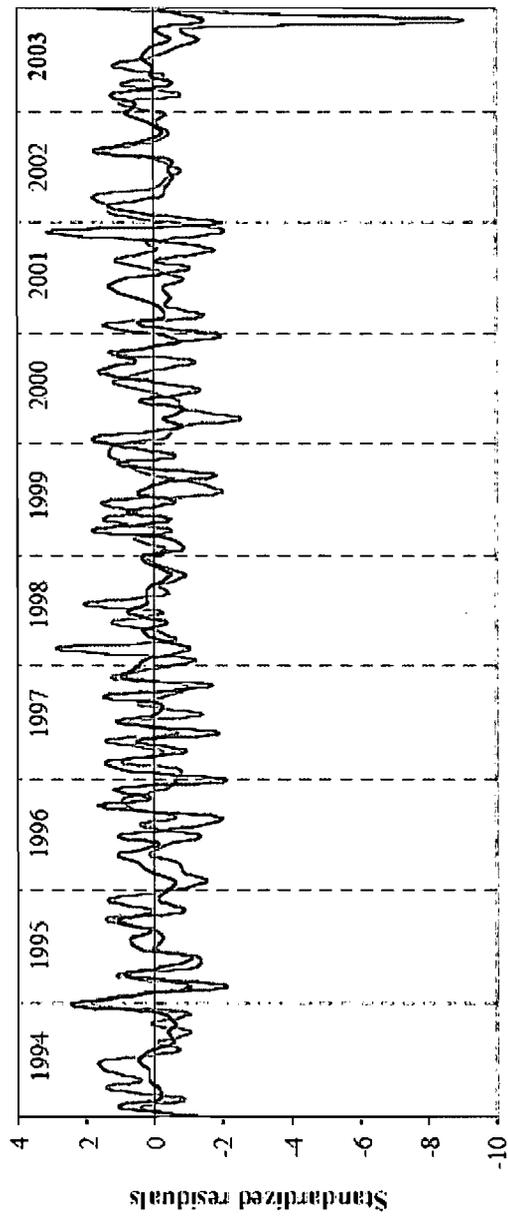


Figure 9: Changes in standardized residuals between 1994 and 2003 for non-urban areas (green) and urban areas (gray) with 2003 extrapolated for the American crow population.

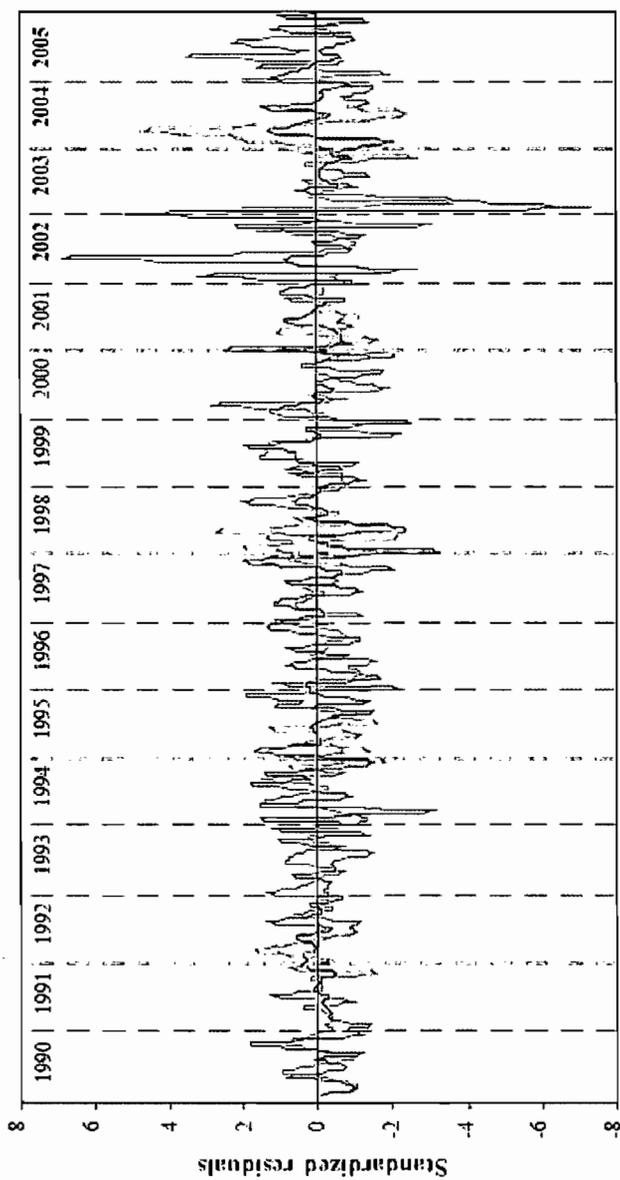


Figure 10: Changes in standardized residuals between 1990 and 2005 for non-urban areas (green) and urban areas (gray) with 2002 to 2005 extrapolated for the American crow population.

### ***Acknowledgements***

The authors would like to thank Jacques Larivée, ornithologist, for providing the EPOQ data, and Stéphanie Brazeau of the Public Health Agency of Canada for her help with the spatial analysis of the data. This project was partly funded by the Public Health Agency of Canada

### ***References***

- [1] Alberti M., Marzluff J.M., Ecological resilience in urban ecosystems: Linking urban patterns to human and ecological functions, *Urban Ecosystems* (2004) 7:241-265.
- [2] Benton T.G., Revealing the ghost in the machine: Using spectral analysis to understand the influence of noise on population dynamics, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (2006) 103:18387-18388.
- [3] Brown K., Dallaire A., Surveillance pour la détection précoce de l'infection par le virus du Nil Occidental chez les oiseaux sauvages au Québec, Saison 2001 (2001) 28 p.
- [4] Brown K., Dallaire A., Surveillance pour la détection précoce de l'infection par le virus du Nil Occidental chez les oiseaux sauvages au Québec, Saison 2002, (2002) 62 p.
- [5] Brown K., Côté N., Lair S., Picard I., Surveillance, prévention et contrôle du virus du Nil occidental sur le territoire québécois, *Rapport d'activités 2005* (2005) 23 p.

- [6] Caffrey C., Female-biased delayed dispersal and helping in American crows, *The Auk* (1992) 109:609-619.
- [7] Farrington C.P., Andrews N.J., Beale A.D., Catchpole M.A., A statistical algorithm for the early detection of outbreaks of infectious disease, *Journal of the Royal Statistical Society. Series A* (1996) 159:547-563.
- [8] Gauthier J., Aubry Y., Corneille d'Amérique, In: Association québécoise des groupes d'ornithologues Société québécoise de protection des oiseaux, Service canadien de la Faune, Environnement Canada, Région du Québec (Ed.), *Les oiseaux nicheurs du Québec - Atlas des oiseaux nicheurs du Québec méridional*, Montréal (Canada), 1995, p726-729.
- [9] Ladeau S.L., Kilpatrick A.M., Marra P., West Nile virus emergence and large-scale decline of North American bird populations, *Nature* (2007) 447:710-713.
- [10] Legendre P., Legendre L., Ecological data series, In: Elsevier Science (Ed.), *Numerical Ecology*, second English edition, Amsterdam, 1998, 853 p.
- [11] Ludwig G.V., Calle P.P., Mangiafico J.A., Raphael B.L., Danner D.K., Hile J.A., Clippinger T.L., Smith J.F., Cook R.A., McNamara T., An outbreak of West Nile virus in a New York City captive wildlife population, *Am J Trop Med Hyg* (2002) 67:67-75.
- [12] Marzluff J.M., Bowman R., Donnelly R., A historical perspective on urban bird research: trends, terms, and approaches, In: J.M. Marzluff, Bowman R. and R.

Donnely (Eds.), Avian ecology and conservation in an urbanizing world, Norwell, MA, Kluwer Academic Press, 2001, p1-17.

- [13] Marzluff J.M., McGowan K.J., Donnely R., Knight R.L., Causes and consequences of expanding American Crow population, In: J.M. Marzluff, Bowman R. and R. Donnely (Eds.), Avian ecology and conservation in an urbanizing world, Norwell, MA, Kluwer Academic Press, 2001, p331-363.
- [14] Marzluff J.M., Neatherlin E., Corvid response to human settlements and campgrounds: Causes, consequences, and challenges for conservation, *Biological Conservation* (2006) 130:301-314.
- [15] McGowan K.J., Demographic and behavioral comparisons of suburban and rural American Crows, In: J.M. Marzluff, Bowman R. and R. Donnely (Eds.), Avian ecology and conservation in an urbanizing world, Norwell, MA, Kluwer Academic Press, 2001, p365-381.
- [16] Moore J.E., Switzer P.V., Preroosting aggregations in the American crow, *Corvus brachyrhynchos*, *Canadian Journal of Zoology* (1998) 76:508-512.
- [17] Rothman K.J., Greenland S., Precision and Validity in Epidemiologic Studies, In: *Modern Epidemiology* - 2nd edition, Philadelphia, Lippincott-Raven Publishers, 1998, p115-135.
- [18] Schuster A., On the investigation of hidden periodicities with application to a supposed 26-day period of meteorological phenomena, *Terr. Mag. Atmos. Elect.* (1888) 3:13-41.

- [19] Verbeek N.A.M., Caffrey C., American crow (*Corvus brachyrhynchos*) - Account Nb647, In: A. Poole and E. Gill Editors, The birds of North America, Academy of Natural Sciences, Philadelphia, Pennsylvania, and American Ornithologists' Union, Washington, D.C., USA, 2002.
- [20] Vincent C., Brown K., Côté N., Brown K., Desbiens J.-Y., Dumont F., Lebel G., Demetriade U., Surveillance, prévention et contrôle du virus du Nil occidental sur le territoire québécois, Rapport d'activités, Année 2003, (2003) 48 p.
- [21] Vincent C., Brown K., Surveillance, prévention et contrôle du virus du Nil occidental sur le territoire québécois, Rapport d'activités, Année 2004, (2004) 21 p.
- [22] Wei W.W.S., Times series analysis: Univariate and multivariate methods (Ed.^Eds.), Don Mills, Ontario, Addison-Wesley Publishing, 1990, 478 p.
- [23] Weseloh D.V.C., The distribution of the American Crow in Ontario in early winter, Ontario Birds (1985) 3:55-63.
- [24] Withey J.C., Marzluff J.M., Dispersal by juvenile American crows (*Corvus brachyrhynchos*) influences population dynamics across a gradient of urbanization, The Auk (2005) 122:205-221.
- [25] Yaremych S.A., Novak R.J., Raim A.J., Mankin P.C., Warner R.E., Home range and habitat use by American crows in relation to transmission of West Nile virus, Wilson Bulletin (2004) 116:232-239.

## **Discussion générale et conclusion**

## **Originalité du travail quant au type de données exploitées**

Une partie de l'originalité de ce travail réside en l'utilisation de données de surveillance et d'observation d'ornithologues amateurs dans un objectif de compréhension de la dynamique de circulation du VNO au sein des populations de corneilles au Québec.

Il existe de nombreuses définitions à la surveillance, mais la plupart se rejoignent sur les éléments suivants : c'est un processus continu et systématique de collection, d'analyse, d'interprétation et de dissémination de données descriptives concernant le suivi de problème de santé (Buethler 1998; El Allaki 2005). Cette description nous place devant la réalité suivante: l'essence de la surveillance réside dans la volonté de détecter précocement les maladies. Une fois cette détection réalisée, on passe à une deuxième phase qui est l'investigation et la maîtrise des épidémies, dont les étapes sont : confirmer l'existence de l'épidémie, définir la maladie (cas), répertorier les cas, décrire les cas en termes de caractéristiques de temps, de lieu et de personnes, établir les hypothèses quant au mode de survenue de l'épidémie, tester ces hypothèses, conduire une enquête environnementale adaptée, mettre en œuvre les analyses microbiologiques nécessaires, mettre en œuvre les mesures de contrôle et de prévention et rédiger un rapport d'investigation pour partager l'expérience acquise avec la communauté de santé publique et scientifique (Desenclos, Vaillant et al. 2007).

Outre les données de surveillance, ce travail a largement utilisé des données d'observation d'un réseau d'ornithologues amateurs au Québec. La méthodologie d'analyse de ces données est assez inédite. Dans la littérature, la modélisation des densités de populations d'oiseaux passe très souvent par l'utilisation d'outils de régression statistiques (régression linéaire simple (Bart, Collins et al. 2003), régression de Poisson incluant des effets fixes et des effets aléatoires (Purcell, Mori et al. 2005;

Ladeau, Kilpatrick et al. 2007), modèles hiérarchiques (Link, Sauer et al. 2006)). Un modèle de régression nous a semblé peu adapté aux données EPOQ étant donné l'importance de la composante harmonique des séries chronologiques de densité de mentions corrigées dont nous avons des valeurs pour chaque mois. L'intégration de données amateurs d'observation de la faune dans une problématique de Santé Publique est aussi une grande originalité de ce travail, d'autant que dans le cadre de la surveillance de la faune sauvage, comme la corneille d'Amérique, il est souvent très difficile d'obtenir des données fiables (Mörner, Obendorf et al. 2002; Buxton 2006). Historiquement, ce type de données était grandement apprécié des biologistes, mais présentait peu d'intérêt pour des épidémiologistes, des médecins, des vétérinaires en relation avec la Santé Publique. La multiplication des maladies zoonotiques trouvant leur réservoir parmi les animaux de la faune sauvage a fait réaliser à la communauté scientifique ainsi qu'aux autorités de Santé Publique la nécessaire intégration des connaissances relatives à la faune sauvage aux restes des connaissances en médecine humaine et vétérinaire. La compréhension actuelle que nous avons des maladies zoonotiques nous renseigne sur les inévitables interactions entre animaux sauvages, animaux domestiques et populations humaines qui sont à l'origine des zoonoses (Buxton 2006). L'épidémiologie est une discipline scientifique dont l'essence propre est de transgresser les frontières entre disciplines car c'est une discipline d'intégration des connaissances. Par nécessité pour la gestion future des problématiques de Santé Publique, nous n'avons d'autres choix que d'emprunter la voix de la multi, inter ou trans-disciplinarité (Choi and Pak 2006) comme cela a été fait dans le présent travail de PhD.

## **Différences et similitudes des populations de corneilles au Québec par rapport au reste de l'Amérique du Nord**

Les résultats rapportés dans le premier article (*Morphological characteristics of American crow populations in southern Québec*) nous ont permis d'identifier les caractéristiques morphologiques des populations de corneilles présentes à l'heure actuelle en Amérique du Nord. Si l'on souhaite comparer ces caractéristiques morphologiques avec celles d'autres populations de corneilles d'Amérique du Nord, en d'autres temps et dans d'autres lieux, ce travail est difficile pour plusieurs raisons. Les sciences biologiques et la taxonomie incluant des concepts comme la génétique ou l'évolution sont des disciplines scientifiques relativement récentes en Amérique du Nord (début du 20<sup>ème</sup> siècle) (Allen 1969). Les études comparatives sur les corneilles d'Amérique sont peu nombreuses depuis cette date, et la méthodologie de chacune de ces études très hétérogène (Johnston 1961), ce qui rend les comparaisons entre elles difficiles et sujettes à controverse.

Les travaux présentés dans l'article 2 (*Risk factors associated with West Nile virus mortality in crow populations in southern Quebec*) et dans l'article 3 (*The analysis of crow population dynamics as a surveillance tool*) démontrent une unicité comportementale des populations de corneilles en Amérique du Nord à au moins deux niveaux :

- les fréquences et taux de mortalité par classes d'âge ne sont pas homogènes au cours de l'année, comme cela a été démontré à travers l'étude des données de surveillance et la mortalité non reliée au virus du Nil occidental (VNO) au cours de l'été 2005;
- l'abondance des populations de corneilles vivantes est très fluctuante au cours d'une année et d'une année sur l'autre, et ceci en fonction du type de milieu considéré, comme cela a été démontré à travers l'étude des données d'observations d'oiseaux vivants par les ornithologues amateurs.

Ces deux points comportementaux ont été observés par le passé dans d'autres populations de corneilles ailleurs sur le continent nord américain grâce à des études ornithologiques de suivi de groupes d'individus identifiés un à un. Nous sommes parvenus à les valider comme également plausibles pour les populations de corneilles au Québec selon des données ornithologiques d'étude de populations à grande échelle sans suivi individuel. Toutefois, les explications que nous pouvons proposer à celles-ci sont restreintes.

Concernant les fluctuations des taux de mortalité, il est communément admis qu'un oiseau jeune, et plus particulièrement dans les toutes premières semaines de vie, est plus vulnérable qu'un oiseau âgé (Verbeek and Caffrey 2002). Ceci peut expliquer les fréquences élevées de cadavres de corneilles jeunes à certains moments de l'année. En revanche, il est plus difficile de fournir une explication aux variations intra-annuelles de mortalité pour les oiseaux de plus de 1 an observées dans les données de surveillance étudiées dans l'article 2. Par exemple, on pourrait se poser la question : pourquoi, en début de saison, on trouve beaucoup moins de cadavres d'individus entre 1 et 2 ans ou d'individus de plus de 2 ans qu'en fin de saison? Rien dans la littérature ne nous permet d'échafauder une hypothèse à ce propos.

Concernant les fluctuations de densités d'oiseaux vivants, le son de cloche est légèrement différent. La littérature nous fournit de bonnes hypothèses pour expliquer les variations de densités observées au sein d'une même année (Marzluff, McGowan et al. 2001; Verbeek and Caffrey 2002). Ces hypothèses sont largement développées et exploitées dans l'article 3 et font référence tout particulièrement à l'âge de la corneille, au comportement spécifique de la corneille selon cet âge et la nature du milieu fréquenté (degré d'urbanisation du milieu). Concernant les fluctuations inter-annuelles (période supérieure à 12 mois) des densités de populations de corneilles, les éléments explicatifs dans la littérature sont beaucoup plus pauvres. Un travail réalisé par une autre équipe de recherche en modélisation théorique nous permet de penser que ces cycles pourraient être reliés à l'existence d'un décalage de l'âge de la maturité sexuelle chez les corneilles

(Greenman, Benton et al. 2005). On sait que, chez la corneille d'Amérique, un tel décalage existe : les Second-Year ne deviennent en fait sexuellement actifs qu'entre 2 et 5 ans (Caffrey 1992; Verbeek and Caffrey 2002). Or, le travail de modélisation théorique en question démontre que dans une population où l'âge de la maturité sexuelle est influencé par la densité de populations d'adultes reproducteurs par un phénomène de rétroaction négative, cela engendre des cycles dans les densités de populations de période entre 2 et 4 fois la durée du délais pour atteindre la maturité sexuelle (Greenman, Benton et al. 2005). En dehors de ce travail, d'autres hypothèses nous semblent valides pour expliquer la périodicité (avec des périodes de plus de 1 an) observée dans les densités de populations de corneilles au Québec. Ces hypothèse concernent l'existence d'un phénomène 'mémoire' dans la population qui agirait comme un frein sur la reproduction avec un délai d'au moins un an (Smith, White et al. 2006).

Il est donc intéressant de constater que les connaissances que nous avons de la corneille d'Amérique sont encore insuffisantes pour expliquer tous les phénomènes observés (que ce soit dans les données de surveillance ou les données d'observation d'oiseaux vivants). Il semblerait que sur cette voie là, la modélisation soit un outil primordial pour élucider les questions encore en suspend. Pour cette raison, un travail de modélisation dynamique des populations de corneilles dans le sud du Québec a été débuté dans le prolongement de ce travail de PhD. Ce travail devrait permettre de savoir si les cycles inter annuels observés dans les densités d'oiseaux vivants peuvent être expliqués par le décalage de la maturité sexuelle, et quel est l'âge de la maturité sexuelle qui correspondrait aux densités de populations de corneilles observées au Québec entre 1990 et 2001.

## **Impact du VNO sur une population de corneilles en milieu naturel**

La mortalité spécifique liée au VNO relaté dans l'article 2 de ce travail, ainsi que les perturbations indéniables observées dans la dynamique de population des corneilles vivantes au Québec relatées dans l'article 3 de ce même travail nous démontrent que le VNO a eu un impact majeur sur les populations de corneilles au Québec. Ces observations sont en concordance avec les observations effectuées de par le continent nord américain sur les taux de mortalité spécifiques liées au VNO observés lorsque le virus atteignaient un groupe de corneilles (Yaremych, Warner et al. 2004; Caffrey, Smith et al. 2005) ou sur les effectifs observés d'oiseaux vivants d'espèces sensibles au VNO en comparant les abondances d'avant le VNO à celles d'après celui-ci (Bonter and Hochachka 2003b; Ladeau, Kilpatrick et al. 2007).

Pourtant, nos résultats semblent démontrer aussi que, suite à l'année 2003 où de fortes perturbations des effectifs de corneilles ont été observées, dès 2004 et 2005, la dynamique semblait récupérer progressivement un aspect normal d'avant le VNO. Parallèlement à nos observations, à travers la littérature, on constate que la quantité de corneilles d'Amérique séropositives pour le VNO dans la population sauvage semble augmenter (Ringia, Blitvich et al. 2004; Bell, Brewer et al. 2006; Gibbs, Wimberly et al. 2006). Ces deux faits sont en faveur d'une adaptation progressive des corneilles d'Amérique du Nord au VNO et réciproquement. Cette adaptation traduit la résilience de la population globale de corneilles et peut être l'effet conjoint de plusieurs phénomènes non identifiés spécifiquement à ce jour : sélection positive des individus les moins sensibles au virus dans la population, augmentation du nombre de jeunes produits par année chez les individus survivants au VNO (diminution de l'âge de la maturité sexuelle, augmentation de la taille ou du nombre de portée par année) pour renouveler la population disparue, mixage et déplacement des populations survivantes pour occuper les niches écologiques laissées vacantes par les individus disparus.... Il est impossible de dire lequel de ces phénomènes joue majoritairement dans le cadre de l'épidémie de VNO en Amérique du Nord. Ce qui est certain c'est que ces différents phénomènes de résilience que l'on observe actuellement sont en total accord à ce qui s'est passé sur

l'Ancien Continent, chez les corneilles toujours, vis-à-vis du VNO. À ce sujet, un travail effectué en Égypte en 1955 a présenté de surprenants résultats : malgré une forte sensibilité expérimentale pour les corneilles exposées au VNO (souche égyptienne locale) et un taux de mortalité de 100% chez ces mêmes individus, l'auteur a observé dans la nature en parallèle des taux de séroprévalence pour le VNO allant de 0 à 70% selon la nature endémique ou non du VNO dans la zone où la corneille a été prélevée (Work, Hurlbut et al. 1955). Ce qu'il faut retenir de ce parallèle entre l'Ancien et le Nouveau Continent c'est qu'une sensibilité et une mortalité expérimentale très forte pour une espèce vis-à-vis d'un agent pathogène (comme cela a été démontré pour la corneille d'Amérique et le VNO souche NY-99 (Komar, Langevin et al. 2003)) ne veut pas forcément dire décimation systématique de cette espèce au cas où l'agent pathogène se retrouverait dans le milieu naturel. Il existe dans la nature de nombreux mécanismes d'adaptation des populations à des éléments 'stresseurs', et ce que nous observons actuellement en Amérique du Nord chez les corneilles vis-à-vis du VNO en est probablement une autre preuve.

Enfin, du point de vue de la santé publique, la résilience des corneilles aura à plus long terme comme conséquence la perte progressive de son statut de 'sentinelle' pour le VNO du fait de la perte progressive de sa sensibilité au virus.

En conclusion, malgré les nombreuses questions que soulèvent ce travail de PhD quand au mécanisme de résilience, de fluctuations des densités de mortalité ou de populations vivantes mis en évidence chez les corneilles du Québec, il nous éclaire sur un aspect fondamental de la dynamique de circulation du virus du Nil occidental au Québec. Cette dynamique semble indubitablement liée à la dynamique comportementale de la corneille et, à se stade de notre travail, on peut affirmer que faire l'économie d'intégrer ces connaissances à l'analyse des données de surveillance du VNO au Québec conduirait à des conclusions totalement erronées.

## **Bibliographie**

- Aguirre, M. A., G. Abramson, et al. (2002). "Simulations in the mathematical modeling of the spread of the Hantavirus." *Physical Review E* 66: 041908.
- Allen, G. E. (1969). "T.H. Morgan and the Emergence of a New Biology." *The Quarterly Review of Biology* 44(2): 168-188.
- Anderson, R. M. and R. M. May (1991). *Infectious diseases of humans : dynamics and control*  
New York Oxford University Press : 757 p.
- Barker, I. and C. Massey (2007). West Nile virus mortality in Ontario crow population.  
University of Guelph. Personal Communication.
- Bart, J., B. Collins, et al. (2003). "Estimating population trends with a linear model." *The Condor* 105: 367-372.
- Beasley, D. W. C., M. R. Holbrook, et al. (2004). "Use of a Recombinant Envelope Protein Subunit Antigen for Specific Serological Diagnosis of West Nile Virus Infection." *Journal of Clinical Microbiology* 42(6): 2759-2765.
- Bell, J. A., C. M. Brewer, et al. (2006). "West Nile virus epizootiology, central Red River Valley, North Dakota and Minnesota, 2002-2005." *Emerging infectious diseases* 12(8): 1245-1247.
- Beroll, H., O. Berke, et al. (2007). "Investigating the spatial risk distribution of West Nile virus disease in birds and humans in southern Ontario from 2002 to 2005." *Population Health Metrics* 5(3): 1-16.

- Beveroth, T. A., M. P. Ward, et al. (2006). "Changes in seroprevalence of West Nile virus across Illinois in free-ranging birds from 2001 through 2004." *Am J Trop Med Hyg* 74(1): 174-179.
- Bierman, S. M., J. P. Fairbairn, et al. (2006). "Changes over Time in the Spatiotemporal Dynamics of Cyclic Populations of Field Voles (*Microtus agrestis* L.)." *The American Naturalist* 167(4): 583-590.
- Bonter, D. N. and W. M. Hochachka (2003a). "Declines of Chickadees and corvids: possible impacts of West Nile virus." *Birdscope* 17(2): 22-25.
- Bonter, D. N. and W. M. Hochachka (2003b). "Taking Count in the Wake of West Nile Virus." *Birdscope* 17(2): 1;14-15.
- Bowman, R. (2005). "A mathematical model for assessing control strategies against West Nile virus." *Bulletin of Mathematical Biology* 67: 1107-1133.
- Brault, A. C., S. Langevin, et al. (2004). "Differential virulence of West Nile strains for American crows." *Emerging Infectious Diseases* 10(12): 2161-68.
- Brewer, D., A. Diamond, et al. (2000). *Canadian atlas of bird banding. Volume1: Doves, cuckoos, and humminbirds through passerines, 1921-1995*, Minister of Environment - Canadian Wildlife Service.
- Brown, K., N. Côté, et al. (2005). *Surveillance, prévention et contrôle du virus du Nil occidental sur le territoire québécois, Rapport d'activités 2005*, Ministère de l'agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec - Institut National de Santé Animale : 23 p.

- Brown, K. and A. Dallaire (2001). Surveillance pour la détection précoce de l'infection par le virus du Nil Occidental chez les oiseaux sauvages au Québec, saison 2001, Centre Québécois sur la Santé des Animaux Sauvages (CQSAS) - Département de pathologie et microbiologie - Faculté de Médecine Vétérinaire - Université de Montréal- Québec - CANADA: 28 p.
- Brown, K. and A. Dallaire (2002). Surveillance pour la détection précoce de l'infection par le virus du Nil Occidental chez les oiseaux sauvages au Québec, saison 2002, Centre Québécois sur la Santé des Animaux Sauvages (CQSAS) - Département de pathologie et microbiologie - Faculté de Médecine Vétérinaire - Université de Montréal- Québec - CANADA: 62 p.
- Brownstein, J. S., T. R. Holford, et al. (2004). "Enhancing West Nile Virus Surveillance, United States." *Emerging Infectious Diseases* 10(8): 1129-1133.
- Brownstein, J. S., H. Rosen, et al. (2002). "Spatial Analysis of West Nile Virus: Rapid Risk Assessment of an Introduced Vector-Borne Zoonosis." *Vector Borne and Zoonotic Diseases* 2(3): 157-164.
- Buethler, J. W. (1998). Surveillance. *Modern Epidemiology*. K. J. Rothman and S. Greenland. Philadelphia, Lippincott William & Wilkins: pp 435-457.
- Buxton, D. (2006). "Wildlife and the risk to humans and domestic animals: A case for disease surveillance." *The Veterinary Journal* 171: 204-205.
- Caccamise, D. F., L. M. Reed, et al. (1997). "Roosting behavior and group territoriality in American crows." *The Auk* 114(4): 628-637.

- Caffrey, C. (1992). "Female-biased delayed dispersal and helping in American crows." *The Auk* 109(3): 609-19.
- Caffrey, C. and C. C. Petersen (2003). "Christmas Bird Count Data suggest West Nile virus may not be a conservation issue in Northeastern United States." *American Birds* 57: 14-21.
- Caffrey, C., S. C. R. Smith, et al. (2005). "West Nile virus devastates an American crow population." *The Condor* 107: 128-132.
- Caffrey, C., T. J. Weston, et al. (2003). "High mortality among marked crows subsequent to arrival of West Nile virus." *Wildlife Society Bulletin* 31(3): 870-872.
- Causey Whittow, G. (2000). *Sturkie's avian physiology*. Toronto, Academic Press : 685 p.
- CCWHC-CCCSF. (2007). "Programme de surveillance du virus du Nil Occidental." Retrieved 2007, from [http://wildlife1.usask.ca/fr/west\\_nile\\_virus/wnv\\_home.php](http://wildlife1.usask.ca/fr/west_nile_virus/wnv_home.php).
- CDC-ArboNET. (2007). "Assessing Capacity for Surveillance, Prvention, and Control of West Nile Virus Infection ---United States, 1999 and 2004." 2007, from <http://www.cdc.gov/ncidod/dvbid/westnile/>.
- CDC, A. (2007, 4/19/2007). "List of the Birds Species Infected by West Nile virus in United States of America." 2007, from <http://www.cdc.gov/ncidod/dvbid/westnile/birdspecies.htm>.
- Centers\_for\_Disease\_Control\_and\_Prevention (2003). *Epidemic/Epizootic West Nile Virus in the United States: Guidelines for Surveillance, Prevention, and Control*. P. H. S. U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention,

- National Center for Infectious Diseases, Division of Vector-Borne Infectious Diseases, Fort Collins, Colorado, 3rd Revision: 27 p.
- Chartier, A. T. (2005). "Can migration counts detect the effects of West Nile virus." *Ontario birds* 23(1): 38-41.
- Childs, J. E., J. W. Krebs, et al. (2007). "Animal-based national surveillance for zoonotic disease: Quality, limitations, and implications of a model system for monitoring rabies." *Preventive Veterinary Medicine* 78: 246-261.
- Choi, B. C. K. and A. W. P. Pak (2006). "Multidisciplinarity, interdisciplinarity and transdisciplinarity in health research, services, education and policy: 1. Definitions, objectives, and evidence of effectiveness." *Clin Invest Med* 29(6): 351-364.
- Clark, R. G., C. J. James, et al. (1991). "Sexing adult and yearling American crows by external measurements and discriminant analysis." *Journal of Field Ornithology* 62(1): 132-8.
- Cotton, P. A. (2003). "Avian migration phenology and global climate change." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 100(21): 12219-12222.
- Cruz-Pacheco, G., L. Estava, et al. (2005). "Modelling the dynamics of West Nile Virus." *Bulletin of Mathematical Biology* 67: 1157-1172.
- Dallaire, A. (2007). Body condition in WNV positive American crows. Faculté de médecine Vétérinaire, University of Montréal, Personal Communication.

- Dauphin, G. and S. Zientara (2007). "West Nile virus: Recent trends in diagnosis and vaccine development." *Vaccine* 25: 5563-5576.
- Davis, T. C., D. W. C. Beasley, et al. (2003). "Genetic variation among temporally and geographically distinct West Nile virus isolates, United States, 2001, 2002." *Emerging Infectious Diseases* 9(11): 1423-29.
- Desenclos, J. C., V. Vaillant, et al. (2007). "Les principes de l'investigation d'une épidémie dans une finalité de santé publique." *Médecine et Maladies infectieuses* 37: 77-94.
- Dobson, A. P. and P. J. Hudson (1992). "Regulation and Stability of a Free-Living Host-Parasite System: *Trichostrongylus tenuis* in Red Grouse. II. Population Models." *The Journal of Animal Ecology* 61(2): 487-498.
- Docherty, D. E., R. R. Long, et al. (2004). "*Corvidae* Feather Pulp and West Nile Virus Detection." *Emerging Infectious Diseases* 10(5): 907-909.
- Dohoo, I., W. Martin, et al. (2003). *Screening and Diagnostic Tests\_ Chapter 5. Veterinary Epidemiologic Research*. S.MargaretMcPike (Ed.). Charlottetown, Prince Edward Island, Canada: pp85-113.
- Dufour, B., P. Hendrikx, et al. (2006). "Élaboration et mise en place de systèmes de surveillance épidémiologique des maladies à haut risque dans les pays développés." *Rev.sci.tech.Off.int.Epiz.* 25(1): 187-198.
- Eidson, M. (2001). "'Neon needles' in a haystack: the advantages of passive surveillance for West Nile virus." *Annals New York Academy of Sciences* 951: 38-53.

- Eidson, M., N. Komar, et al. (2001). "Crow Deaths as a Sentinel Surveillance System for West Nile Virus in the Northeastern United States, 1999." *Emerging Infectious Diseases* 7(4): 615-620.
- Eidson, M., L. Kramer, et al. (2001). "Dead Bird Surveillance as an Early Warning System for West Nile Virus." *Emerging Infectious Diseases* 7(4): 631-635.
- Eidson, M., J. R. Miller, et al. (2001). "Dead crow densities and human cases of West Nile virus, New-York State, 2000." *Emerging Infectious Diseases* 7(4): 662-664.
- El Allaki, F. (2005). *Théorie de la surveillance de la santé des populations*. Département de Pathologie et Microbiologie - Faculté de médecine vétérinaire. Montréal, Université de Montréal. PhD: 294p.
- Emlen, J. T. J. (1938). "Midwinter distribution of the American crow in the New York State." *Ecology* 19(2): 264-275.
- Emlen, J. T. J. (1940). "The Midwinter distribution of the crow in California." *The Condor* 42: 287-294.
- Emlen, J. T. J. (1942). "Notes on a nestling colony of western crows." *Bird Banding* 13(4): 143-154.
- Fang, Y. and W. K. Reisen (2006). "Previous infection with West Nile or St.Louis Encephalitis viruses provides cross protection during reinfection in house finches." *Am J Trop Med Hyg* 75(3): 480-485.

- Fleiss, J. L. (1981). *Statistical Methods for Rates and Proportion*. New York, John Wiley and Sons.
- Floral, T. M. A., R. A. French, et al. (2007). "Fluorescent Antibody Test for Rapid Detection of West Nile Virus Antigen in Avian Tissues." *Avian Diseases* 51: 601-605.
- Fonseca, D. M., N. Keyghobadi, et al. (2004). "Emerging vectors in the *Culex pipiens* Complex." *Science* 303: 1535-1538.
- Gangz, A. Y., G. D. Campbell, et al. (2004). "Detecting West Nile Virus in Owls and Raptors by an Antigen-capture Assay." *Emerging Infectious Diseases* 10(12): 2204-2206.
- Gangz, A. Y., I. K. Barker, et al. (2004). "West Nile Outbreak in North American Owls, Ontario, 2002." *Emerging Infectious Diseases* 10(12): 2135-2142.
- Garvin, M. C., K. A. Tarvin, et al. (2004). "Patterns of West Nile virus infection in Ohio Blue Jays: implications for initiation of the annual cycle." *Am J Trop Med Hyg* 70(5): 566-570.
- Gauthier, J. and Y. Aubry (1995). *Corneille d'Amérique. Les oiseaux nicheurs du Québec - Atlas des oiseaux nicheurs du Québec méridional*. Société québécoise de protection des Oiseaux, Association québécoise des groupes d'ornithologues, Service canadien de la Faune, Environnement Canada, Région du Québec Montréal (Canada): 726-729.
- Gibbs, S. E. J. (2005). "WNV antibody persistence in pigeons." *South-eastern Cooperative Wildlife Disease Study Brief* 20: 3-4.

- Gibbs, S. E. J., A. B. Allison, et al. (2006). "West Nile virus antibodies in avian species of Georgia, USA: 2000-2004." *Vector borne and zoonotic diseases* (Larchmont, N.Y.) 6(1): 57-72.
- Gibbs, S. E. J., M. C. Wimberly, et al. (2006). "Factors Affecting the Geographic Distribution of West Nile Virus in Georgia, USA: 2002-2004." *Vector Borne and Zoonotic Diseases* 6(1): 73-82.
- Gibbs, S. E. J., A. E. Ellis, et al. (2005). "West Nile virus detection in the organs of naturally infected blue jays (*Cyanocitta cristata*)." *Journal of Wildlife Diseases* 41(2): 354-362.
- Giladi, M., E. Metzkor-Cotter, et al. (2001). "West Nile Encephalitis in Israel, 1999: The New York Connection." *Emerging Infectious Diseases* 7(4): 659-661.
- Glaser, A. (2004). "West Nile virus and North America: an unfolding story." *Rev.sci.tech.Off.int.Epiz.* 23(2): 557-568.
- Good, E. E. (1952). *The life history of the American crow-Corvus brachyrhynchos* Brehm, Ohio State University. Degree Doctor of Philosophy: 188 p.
- Gorenzel, W. P. and T. P. Salmon (1995). "Characteristics of American crow urban roosts in California." *Journal of Wildlife Management* 59(4): 638-645.
- Gosselin, P., G. Lebel, et al. (2005). "The Integrated System for Public Health Monitoring of West Nile Virus (ISPHM-WNV): a real time GIS for surveillance and decision making." *International Journal of Health Geographics* 4(21): 1-12.

- Greenman, J. V. and T. G. Benton (2003). "The Amplification of Environmental Noise in Population Models: Causes and Consequences." *The American Naturalist* 161(2): 225-239.
- Greenman, J. V., T. G. Benton, et al. (2005). "The Evolution of Oscillatory Behavior in Age-Structured Species." *The American Naturalist* 166(1): 68-78.
- Grinev, A., S. Daniel, et al. (2008). "Genetic Variability of West Nile Virus in US Blood Donors, 2002-2005." *Emerging Infectious Diseases* 14(3): 436-444.
- Hansen, T. F., N. C. Stenseth, et al. (1999). "Multiannual Vole Cycles and Population Regulation during Long Winters: An Analysis of Seasonal Density Dependence." *The American Naturalist* 154(2): 129-139.
- He, D. and D. J. D. Earn (2007). "Epidemiological effects of seasonal oscillations in birth rates." *Theoretical Population Biology* 72: 274-291.
- Health\_Canada. (2006). "Virus du Nil Occidental MONITEUR." 2007, from [http://www.phac-aspc.gc.ca/wnv-vwn/index\\_f.html](http://www.phac-aspc.gc.ca/wnv-vwn/index_f.html).
- Hering, P. E. (1934). "The food of the American crow in Centrale New York State." *The Auk* 51: 470-476.
- Hosseini, P. R., A. A. Dhondt, et al. (2004). "Seasonality and wildlife disease: how seasonal birth, aggregation and variation in immunity affect the dynamics of *Mycoplasma gallisepticum* in house finches." *Proc R. Soc Lond. B* 271: 2569-2577.

- Ignatiuk, J. B. and R. G. Clark (1991). "Breeding biology of American crows in Saskatchewan parkland habitat." *Can J Zool* 69(168-175).
- Johnson, G. D., M. Eidson, et al. (2006). "Geographic Prediction of Human Onset of West Nile Virus Using Dead Crow Clusters: An Evaluation of Year 2002 Data in New York State." *Am. J. Epidemiol.* 163(2): 171-180.
- Johnston, D. W. (1961). *The biosystematics of the American crows.* Seattle, University of Washington Press : 117 p.
- Julian, K. G., M. Eidson, et al. (2002). "Early season crow mortality as a sentinel for west nile virus disease in Humans, Northeastern United States." *Vector Borne and Zoonotic Diseases* 2(3): 145-155.
- Kenkre, V. M., R. R. Parmenter, et al. (2005). "A Theoretical Framework for the Analysis of West Nile Virus Epidemic." *Computers & Mathematics with Applications* 42: 313-324.
- Kilham, L. (1984). "Cooperative breeding of American crows." *Journal of Field Ornithology* 55(3): 349-356.
- Kilpatrick, A. M., S. L. Ladeau, et al. (2007). "Ecology of West Nile Virus transmission and its impact on birds in the western hemisphere." *The Auk* 124(4): 1121-1136.
- Komar, N. (2001). "West Nile virus surveillance using Sentinel Birds." *Annals of the New York Academy of Sciences* 951: 58-73.
- Komar, N., S. Langevin, et al. (2003). "Experimental infection of North American birds with the New York 1999 Strain of West Nile Virus." *Emerging Infectious Diseases* 9(3): 311-322.

- Komar, N., N. A. Panella, et al. (2001). "Serologic Evidence for West Nile Virus Infection in Birds in the New York City Vicinity During an Outbreak in 1999." *Emerging Infectious Diseases* 7(4): 621-625.
- Kramer, L. and K. A. Bernard (2001). "West Nile virus in the western hemisphere." *Current Opinion in Infectious Diseases* 14(5): 519-525.
- Kulasekera, V. L., L. Kramer, et al. (2001). "West Nile virus infection in Mosquitoes, Birds, Horses and Humans, Staten Island, New York, 2000." *Emerging Infectious Diseases* 7(4): 722-725.
- Ladeau, S. L., A. M. Kilpatrick, et al. (2007). "West Nile virus emergence and large-scale decline of North American bird populations." *Nature* 447: 710-713.
- Lanciotti, R. S. (1999). "Origin of the West Nile Virus Responsible for an Outbreak of Encephalitis in the Northeastern United States." *Science* 286: 2333-2337.
- Langevin, S. A., M. Bunning, et al. (2001). "Experimental Infection of Chickens as Candidate Sentinels for West Nile Virus." *Emerging Infectious Diseases* 7(4): 726-729.
- Lindsay, R., I. Barker, et al. (2003). "Rapid antigen-capture assay to detect West Nile virus in dead corvids." *Emerging Infectious Diseases* 9(11): 1406-1410.
- Link, W. A., J. R. Sauer, et al. (2006). "A hierarchical model for regional analysis of population change using Christmas Bird Count data, with application to the American Black Duck." *The Condor* 108: 13-24.

- Lord, C. C. and J. F. Day (2001a). "Simulation Studies of St. Louis Encephalitis Virus in South Florida." *Vector Borne and Zoonotic Diseases* 1(4): 299-315.
- Lord, C. C. and J. F. Day (2001b). "Simulation Studies of St. Louis Encephalitis and West Nile Viruses: The Impact of Bird Mortality." *Vector Borne and Zoonotic Diseases* 1(4): 317-329.
- Ludwig, G. V., P. P. Calle, et al. (2002). "An outbreak of West Nile virus in a New York city captive wildlife population." *Am J Trop Med Hyg* 67(1): 67-75.
- Malan, A. K., P. J. Stipanovich, et al. (2003). "Detection of IgG and IgM to West Nile Virus: Development of an Immunofluorescence Assay." *Am J Clin Pathol* 119: 508-515.
- Malkinson, M., C. Banet, et al. (2001). "Use of Live and Inactivated Vaccines in the Control of West Nile Fever in Domestic Geese." *Annals New York Academy of Sciences* 951: 255-261.
- Malkinson, M. and C. Banet (2002). "The Role of Birds in the Ecology of West Nile Virus in Europe and Africa." *Current topics in microbiology and immunology* 267: 309-322.
- Marfin, A. A., L. R. Petersen, et al. (2001). "Widespread West Nile Virus Activity, Eastern United States, 2000." *Emerging Infectious Diseases* 7(4): 730-735.
- Marra, P. P., S. Griffing, et al. (2004). "West Nile Virus and Wildlife." *BioScience* 54(5): 393-402.

- Marzluff, J. M., R. Bowman, et al. (2001). A historical perspective on urban bird research: trends, terms, and approaches. *Avian ecology and conservation in an urbanizing world*. J. M. Marzluff, Bowman, R. and R. Donnelly, eds. Norwell, MA, Kluwer Academic Press: 1-17.
- Marzluff, J. M., K. J. McGowan, et al. (2001). Causes and consequences of expanding American Crow population. *Avian ecology and conservation in an urbanizing world*. J.M. Marzluff, Bowman R. and R. Donnelly, eds. Norwell, MA, Kluwer Academic Press: 331-363.
- Marzluff, J. M. and E. Neatherlin (2006). "Corvid response to human settlements and campgrounds: Causes, consequences, and challenges for conservation." *Biological Conservation* 130(2): 301-314.
- McGowan, K. J. (2001). Demographic and behavioral comparisons of suburban and rural American Crows. *Avian ecology and conservation in an urbanizing world*. J.M. Marzluff, Bowman R. and R. Donnelly, eds. Norwell, MA, Kluwer Academic Press: 365-381.
- McLean, R. G., S. R. Ubico, et al. (2002). "West Nile virus in Livestock and Wildlife." *Current topics in microbiology and immunology* 267: 271-308.
- Moore, J. E. and P. V. Switzer (1998). "Preroosting aggregations in the American crow, *Corvus brachyrhynchos*." *Canadian Journal of Zoology* 76: 508-512.
- Mörner, T., D. L. Obendorf, et al. (2002). "Surveillance and monitoring of wildlife diseases." *Rev.sci.tech.Off.int.Epiz.* 21(1): 67-76.
- MSSS\_Québec. (2006). "Virus du Nil Occidental: résultats de surveillance." 2007, from <http://www.virusdunil.info/>.

- MSSS\_Québec. (2008). "Virus du Nil Occidental: résultats de surveillance." 2008, from <http://www.virusdunil.info/>.
- Ostlund, E. N., J. E. Andersen, et al. (2000). "West Nile Encephalitis." *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* 16(3): 427-441.
- Padgett, K. A., B. Cahoon-Young, et al. (2006). "Field and Laboratory Evaluation of Diagnostic Assays for Detecting West Nile Virus in Oropharyngeal Swabs from California Wild Birds." *Vector-Borne and Zoonotic Diseases* 6(2): 183-191.
- Petersen, L. R. and A. A. Marfin (2002). "West Nile virus: a primer for the clinician." *Annals of Internal Medicine* 137: 173-179.
- Phalen, D. N. (2004). "West Nile virus." *Seminars in Avian and Exotic Pet Medicine* 13(2): 67-78.
- Purcell, K. L., S. R. Mori, et al. (2005). "Design considerations for examining trends in avian abundance using point counts: examples from oak woodlands." *The Condor* 107: 305-320.
- Pyle, P. (1997). *Identification guide to North American birds, Part I*. Slate Creek, Bolina, California, USA : 691 p.
- Rappole, J. H., S. R. Derrickson, et al. (2000). "Migratory Birds and Spread of West Nile Virus in the Western Hemisphere." *Emerging Infectious Diseases* 6(4): 319-328.
- Reisen, W. K., C. M. Barker, et al. (2006). "Role of corvids in epidemiology of West Nile virus in Southern California." *Journal of Medical Entomology* 43(2): 356-367.

- Rhoads, S. W. (1886). "Crow roosts and roosting crows." *The American Naturalist* 20(9): 777-787.
- Ringia, A. M., B. J. Blitvich, et al. (2004). "Antibody prevalence of West Nile virus in Birds, Illinois, 2002." *Emerging Infectious Diseases* 10(6): 1120-1124.
- Schaefer, J. M. (1983). *The Common Crow as a sentinel species for rabies in wildlife population.* Ames, Iowa State University. PhD dissertation: 83 p.
- Scott Sillet, T., R. T. Holmes, et al. (2000). "Impacts of Global Climate Cycle on Population Dynamics of a Migratory Songbird." *Science* 288: 2040-2042.
- Siirin, M., C. Sargent, et al. (2004). "Comparative Sensitivity of the VectTest Antigen-Capture Assay, Reverse Transcriptase, and Cell Culture for Detection of West Nile Virus in Dead Birds." *Vector Borne and Zoonotic Diseases* 4(3): 204-209.
- Smedley, R. C., J. S. Patterson, et al. (2007). "Sensitivity and specificity of monoclonal and polyclonal immunohistochemical staining for West Nile virus in various organs from American crows (*Corvus barchyrhynchus*)." *BMC Infectious Diseases* 7: 49.
- Smith, M. J., A. R. White, et al. (2006). "Delayed Density-Dependent Season Length Alone Can Lead to Rodent Population Cycles." *The American Naturalist* 167(5): 695-704.
- Smith, M. J., A. R. White, et al. (2008). "Disease effects on reproduction can cause population cycles in seasonal environments." *Journal of Animal Ecology* 77: 378-389.

- Steele, K. E., M. J. Linn, et al. (2000). "Pathology of Fatal West Nile Virus Infections in Native and Exotic Birds during the 1999 Outbreak in New York City, New York." *Vet Pathol* 37: 208-224.
- Stenseth, N. C., A. Mysterud, et al. (2002). "Ecological Effects of Climate Fluctuations." *Science* 297: 1292-1296.
- Stone, W. B., J. C. Okoniewski, et al. (2004). "VecTest as diagnostic and surveillance tool for West Nile virus in dead birds." *Emerging Infectious Diseases* 10(12): 2175-2181.
- Stone, W. B., J. E. Therrien, et al. (2005). "Assays to Detect West Nile Virus in Dead Birds." *Emerging Infectious Diseases* 11(11): 1770-1773.
- Sullivan, B. D. and J. J. Dinsmore (1992). "Home range and foraging habitat of American crows, *Corvus brachyrhynchos*, in a Waterfowl breeding area in Manitoba." *The Canadian Field-Naturalist* 106: 181-184.
- Theophilides, C. N., S. C. Ahearn, et al. (2003). "Identifying West Nile virus areas: the dynamic continuous-area Space-Time system." *American Journal of Epidemiology* 157: 843-854.
- Thomas, D. M. and B. Urena (2001). "A Model Describing the Evolution of West Nile-Like Encephalitis in New York City." *Mathematical and Computer Modelling* 34: 771-781.
- Townsend Peterson, A., D. A. Vieglais, et al. (2003). "Migratory Birds Modeled as Critical Transport Agents for West Nile Virus in North America." *Vector Borne and Zoonotic Diseases* 3(1): 27-37.

- USGS. (2006). "Migration of Birds." USGS Northern Prairie Wildlife Research Center, 2005, from <http://www.npwrc.usgs.gov/resource/othrdata/migratio/>.
- Van Der Meulen, K. M., M. B. Pensaert, et al. (2005). "West Nile virus in the vertebrate world." *Archives of Virology* 150: 637-657.
- Verbeek, N. A. M. and C. Caffrey (2002). American crow (*Corvus brachyrhynchos*) - Account Nb647. *The birds of North America*. . Poole and E. Gill (Eds.). Academy of Natural Sciences, Philadelphia, Pennsylvania, and American Ornithologists' Union, Washington, D.C., USA.
- Vincent, C. and K. Brown (2004). Surveillance, prévention et contrôle du virus du Nil occidental sur le territoire québécois, Rapport d'activités, Année 2004, Ministère de l'agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec - Institut National de Santé Animale: 21 p.
- Vincent, C., K. Brown, et al. (2003). Surveillance, prévention et contrôle du virus du Nil occidental sur le territoire québécois, Rapport d'activités, Année 2003, Ministère de l'agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec - Institut National de Santé Animale: 48 p.
- Ward, M. R., D. E. Stallknecht, et al. (2006). "Wild bird mortality and West Nile virus surveillance: biases associated with detection, reporting, and carcass persistence." *Journal of Wildlife Diseases* 42(1): 92-106.
- Watson, J. T., R. C. Jones, et al. (2004). "Dead crow reports and location of human West Nile virus cases, Chicago, 2002." *Emerging Infectious Diseases* 10(5): 938-940.

- Winkler, D. W., P. O. Dunn, et al. (2002). "Predicting the effects of climate change on avian life-history traits." *Proceedings Of The National Academy of Sciences of the USA* 99(21): 13595-13599.
- Wonham, M. J., T. de-Camino-Beck, et al. (2004). "An epidemiological model for West Nile virus: invasion analysis and control applications." *Proc R. Soc Lond. B* 271: 501-507.
- Work, T., H. S. Hurlbut, et al. (1955). "Indigenous Wild Birds of the Nile Delta as potential West Nile Virus circulating reservoirs." *Am J Trop Med Hyg* 4: 872-888.
- Yaremych, S. A., R. J. Novak, et al. (2004). "Home range and habitat use by American crows in relation to transmission of west nile virus." *Wilson Bulletin* 116(3): 232-239.
- Yaremych, S. A., R. E. Warner, et al. (2004). "West Nile Virus and High Death Rate in American Crows." *Emerging Infectious Diseases* 10(4): 709-711.

## **Annexes**

## Sensibilité et Spécificité d'un test diagnostique

L'intérêt d'un test diagnostique est évalué, entre autre, selon les valeurs de spécificité et de sensibilité qui lui sont associées. Plus ces valeurs sont hautes, meilleur est le test. Les concepts de sensibilité et spécificité sont plus facilement compréhensibles si l'on se réfère à un tableau de contingence 2\*2, représentant les états de maladie (malade / non malade) en fonction du résultat du test (test positif / test négatif) (Dohoo, Martin et al. 2003).

	Test Positif (T+)	Test Négatif (T-)	Total
Malade (M+)	<i>a</i> (Vrai Positif)	<i>b</i> (Faux négatif)	<i>m<sub>1</sub></i>
Non Malade (M-)	<i>c</i> (Faux Positif)	<i>d</i> (Vrai Négatif)	<i>m<sub>0</sub></i>
Total	<i>n<sub>1</sub></i>	<i>n<sub>0</sub></i>	<i>n</i>

La sensibilité d'un test correspond à la probabilité pour un animal réellement malade d'avoir un test positif [ $p(T+/M+)$ ]. La sensibilité correspond au rapport  $Se = a/m_1$ .

La spécificité d'un test correspond à la probabilité pour un animal réellement non malade d'avoir un test négatif [ $p(T-/M-)$ ]. La spécificité correspond au rapport  $Sp = d/m_0$ .

Souvent, le statut réel de l'individu (M+ ou M-) est inconnu. Les mesures de sensibilité et de spécificité sont donc calculées par rapport à un test de référence (ou 'gold standard'), qui est supposé être le test le plus sensible et le plus spécifique disponible (Dohoo, Martin et al. 2003).

On distingue couramment deux types de tests diagnostiques : les tests indirects (sérologiques) qui sont basés sur la détection d'anticorps spécifiques au virus présents

dans l'organisme de l'individu, et les tests directs qui sont basés sur la détection du virus lui-même au sein du même organisme.

## Mesures morphologiques chez les oiseaux

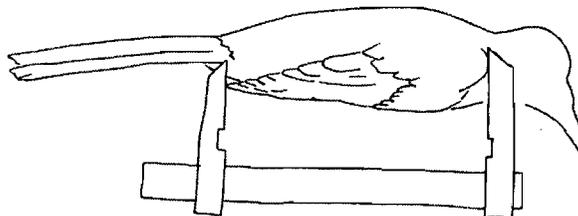
L'ensemble des éléments de revue de littérature suivants sont issus du livre très complet de Pyle sur les mesures morphométriques chez les oiseaux (Pyle 1997).

Les mesures morphométriques sont des techniques utiles pour l'identification d'une espèce, ainsi que pour la détermination du sexe et de l'âge d'un individu vivant que l'on tient dans la main.

Concernant la détermination du sexe selon les mesures morphométriques, la grande majorité du temps, les mâles sont plus grands que les femelles, sauf chez plusieurs espèces de chouettes. Concernant la détermination de l'âge selon les mesures morphométriques, les différences de longueur selon l'âge sont plus subtiles, si bien que l'exercice peut être difficile. De façon générale, la détermination de l'âge selon les mesures morphométriques n'est pas recommandée, sauf s'il est fait au sein du même sexe.

### *Longueur de l'aile*

Il existe deux méthodes principales pour mesurer la longueur de l'aile chez un oiseau. La méthode la plus couramment utilisée en Amérique du Nord est la méthode de mesure de l'aile 'non aplatie', alors qu'en Europe, la méthode la plus couramment utilisée est la mesure de l'aile 'aplatie'.



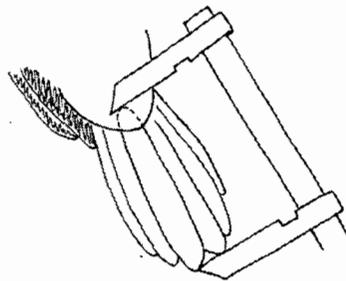
La mesure de l'aile est effectuée comme indiqué sur le schéma ci-dessus, entre l'angle du poignet et l'extrémité distale de la plus longue des rémiges primaires. Cette mesure est prise aile fermée, afin de ne pas blesser l'oiseau s'il est vivant lorsqu'on le manipule. L'aplatissement de l'aile consiste en une légère pression que l'on peut exercer avec le pouce sur l'aile pour qu'elle soit la plus plate possible (une aile est naturellement bombée sinon). La mesure peut être prise avec une règle métallique rigide ou un mètre ruban.

La variation des résultats obtenus selon une mesure effectuée sur une aile aplatie et non aplatie se situe entre 0.5% et 2%.

Cette mesure étant basée sur la longueur de certaines plumes de l'aile (les rémiges), il faut s'assurer que celle-ci sont intactes et non endommagées, manquantes, ou en croissance à cause d'une mue récente.

### ***Longueur de la queue***

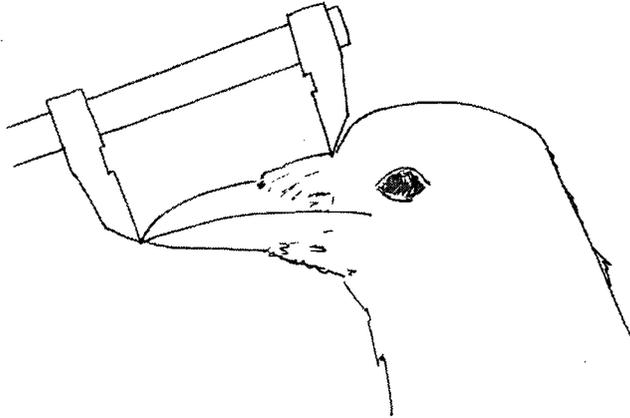
La longueur de la queue est définie comme la distance entre l'extrémité de la plus longue rectrice (plumes de la queue) et le point d'insertion des deux rectrices centrales (cf schéma ci-contre). Comme pour la longueur de l'aile, il faut s'assurer que les rectrices soient intactes et non endommagées, manquantes, ou en croissance à cause d'une mue récente.



On conseille l'usage d'un caliper (règle métallique avec système de butoir) pour prendre cette mesure.

### ***Longueur du bec***

Il existe plusieurs façons de mesurer la longueur du bec. Une première méthode consiste en la mesure de la distance entre l'extrémité antérieure de la narine et la pointe du bec. Une seconde méthode (cf schéma ci-dessous) consiste en la mesure de la distance entre la zone d'insertion de plumes à la base du bec et la pointe du bec.

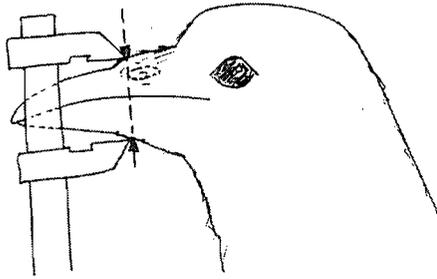


La mesure du bec peut être prise sur des becs courbés (exemple des becs de rapaces). C'est pour cette raison que l'on conseille l'usage d'un caliper pour prendre cette longueur, ce qui donne la longueur de la corde définie par la courbe formée par le bec et non la longueur absolue du bec.

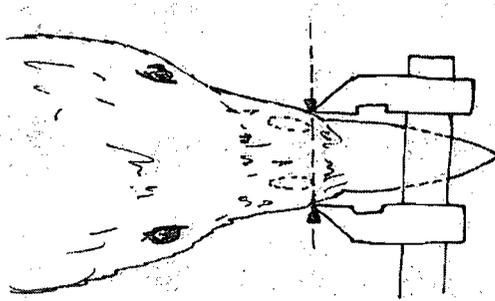
En prenant cette mesure, il faut s'assurer au préalable du bon état du bec (pas de cassures). On note aussi une légère différence de longueur des becs en fonction de la saison (longueur du bec plus grande en été qu'en hiver).

### ***Profondeur et largeur du bec***

Ces deux mesures sont prises au niveau de l'extrémité antérieure (distales) des narines. Une fois de plus et en raison de la forme arrondie du bec, on utilisera de préférence un caliper pour prendre la mesure. La profondeur du bec correspond à la distance (corde) entre la ligne du culmen et la ligne la plus basse de la mandibule (cf schéma ci-dessous).



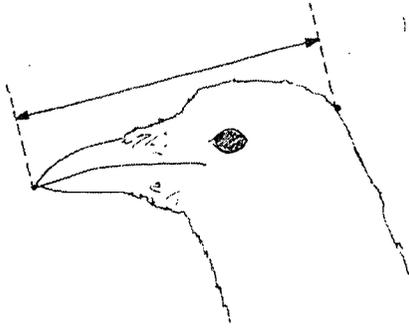
La largeur du bec correspond à la distance entre les deux bords latéraux du bec (cf schéma ci-dessous).



Avant de prendre ces deux mesures, il faut s'assurer de l'intégrité du bec, et être certain que le bec soit fermé correctement. Lors de la mesure, il faut placer le caliper à l'orthogonal part rapport à l'axe du bec.

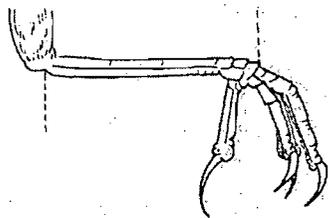
### ***Distance tête-bec***

Cette mesure correspond à la distance entre la crête occipitale du crâne (à palper avec le doigt sous les plumes de la base du crâne) et la pointe du bec. On utilise pour la mesure un caliper, qui devra être placé parallèlement à l'axe du bec. Il faudra, avant de prendre cette mesure, s'assurer de l'intégrité du bec (cassures).



### ***Longueur du tarse***

La longueur du tarse est relativement peu utilisée dans les études morphométriques pour deux raisons : elle est difficile à prendre sur un oiseau vivant, et elle présente en général peu de variation entre individus d'espèces et de sexe similaires.



Une fois de plus cette mesure doit être prise avec un caliper. Elle correspond à la distance entre la jonction tarso-métatarsienne et la dernière écaille recouvrant les os de la 'cheville' avant que les doigts ne se divisent.



094	.....Oie neuse	032	.....Océanite de Wilson	261	.....Barge marbrée	361	.....Petit-duc maculé	495	.....Mésange à tête noire	651	.....Paruline flamboyante
096	.....Oie des neiges	030	.....Océanite cul-blanc	231	.....Tournepiere à collier	364	.....Grand-duc d'Amérique	500	.....Mésange à tête brune	637	.....Paruline couronnée
098	.....Oie de Ross	052	.....Fou de Bassan	245	.....Bécasseau maubèche	365	.....Harfang des neiges	502	.....Mésange bicoloré	638	.....Paruline des ruisseaux
089	.....Bemache du Canada	054	.....Connoran à aigrettes	266	.....Bécasseau sanderling	366	.....Chouette épervière	510	.....Sittelle à poitrine rousse	641	.....Paruline à gorge grise
859	.....Bemache de Hutchins	053	.....Grand Cormoran	258	.....Bécasseau semipalmé	371	.....Chouette rayée	509	.....Sittelle à poitrine blanche	642	.....Paruline triste
090	.....Bemache cravant	075	.....Butor d'Amérique	252	.....Bécasseau minuscule	373	.....Chouette lapone	513	.....Grimpeur brun	644	.....Paruline masquée
084	.....Cygne tuberculé	074	.....Petit Blongios	250	.....Bécasseau à croupion blanc	374	.....Hibou moyen-duc	522	.....Troglodyte de Caroline	649	.....Paruline à calotte noire
086	.....Cygne siffleur	063	.....Grand Héron	251	.....Bécasseau de Baird	375	.....Hibou des marais	519	.....Troglodyte familier	650	.....Paruline du Canada
110	.....Canard branchu	069	.....Grande Aigrette	249	.....Bécasseau à poitrine cendrée	376	.....Nyctale de Tengmalm	520	.....Troglodyte mignon	683	.....Tangara écarlate
109	.....Canard chipeau	070	.....Aigrette neigeuse	246	.....Bécasseau violet	377	.....Petite Nyctale	525	.....Troglodyte à bec court	718	.....Tohi à flancs roux
115	.....Canard siffleur	066	.....Aigrette bleue	254	.....Bécasseau variable	382	.....Engoulevent d'Amérique	524	.....Troglodyte des marais	752	.....Bruant hudsonien
116	.....Canard d'Amérique	067	.....Héron garde-boeufs	257	.....Bécasseau à échasses	379	.....Engoulevent bois-pourri	557	.....Roilelet à couronne dorée	753	.....Bruant familier
107	.....Canard noir	065	.....Héron vert	260	.....Bécasseau roussâtre	385	.....Martinet ramoneur	558	.....Roilelet à couronne rubis	754	.....Bruant des plaines
102	.....Canard colvert	072	.....Bihoreau gris	265	.....Combattant varié	389	.....Colibri à gorge rubis	555	.....Gobemoucheron gris-bleu	756	.....Bruant des champs
113	.....Sarcelle à ailes bleues	078	.....Ibis falcinelle	255	.....Bécassin roux	405	.....Marlin-pêcheur d'Amérique	546	.....Merlebleu de l'Est	734	.....Bruant vespéral
117	.....Canard souchet	144	.....Urubu à tête rouge	256	.....Bécassin à long bec	416	.....Pic à tête rouge	545	.....Grive fauve	725	.....Bruant des prés
110	.....Canard pilet	171	.....Balbuzard pêcheur	234	.....Bécassin de Wilson	413	.....Pic à ventre roux	544	.....Grive à joues grises	726	.....Bruant sauterelle
112	.....Sarcelle d'hiver	169	.....Pygargue à tête blanche	272	.....Phalarope de Wilson	419	.....Pic maculé	538	.....Grive de Bicknell	728	.....Bruant de Le Conte
121	.....Fuligule à dos blanc	170	.....Busard Saint-Martin	271	.....Phalarope de Wilson	423	.....Pic mineur	543	.....Grive à dos olive	730	.....Bruant de Nelson
119	.....Fuligule à tête rouge	152	.....Épervier brun	272	.....Phalarope à bec étroit	422	.....Pic chevelu	542	.....Grive solitaire	770	.....Bruant chanteur
120	.....Fuligule à collier	153	.....Épervier de Cooper	270	.....Phalarope à bec large	430	.....Pic à dos rayé	541	.....Grive des bois	768	.....Bruant de Lincoln
122	.....Fuligule milouinan	151	.....Autour des palombes	273	.....Labba pomaïn	429	.....Pic à dos noir	539	.....Merle d'Amérique	769	.....Bruant des marais
123	.....Petit Fuligule	156	.....Buse à épaulettes	274	.....Labbe parasite	408	.....Pic flamboyant	529	.....Moqueur chat	764	.....Bruant à gorge blanche
131	.....Eider à tête grise	157	.....Petite Buse	275	.....Labbe à longue queue	412	.....Grand Pic	528	.....Moqueur polyglotte	760	.....Bruant à couronne blanche
130	.....Eider à duvet	154	.....Buse à queue rousse	288	.....Mouette atricille	462	.....Moucheron à côtés olive	530	.....Moqueur roux	744	.....Junco ardoisé
128	.....Arlequin plongeur	163	.....Buse pattue	289	.....Mouette de Franklin	460	.....Picou de l'Est	569	.....Étourneau sansonnet	773	.....Bruant lapon
135	.....Macreuse à front blanc	168	.....Aigle royal	291	.....Mouette pygmée	449	.....Moucheron à ventre jaune	562	.....Pipit d'Amérique	687	.....Cardinal rouge
134	.....Macreuse brune	178	.....Crécerelle d'Amérique	287	.....Mouette neuse	451	.....Moucheron des aulnes	564	.....Jaseur boréal	689	.....Cardinal à poitrine rose
136	.....Macreuse noire	177	.....Faucon émerillon	290	.....Mouette de Bonaparte	465	.....Moucheron des saules	565	.....Jaseur d'Amérique	692	.....Passerin indigo
127	.....Harelde kakawi	173	.....Faucon gerfaut	285	.....Goéland à bec cerclé	452	.....Moucheron tchébec	602	.....Paruline à ailes bleues	697	.....Dickcissel d'Amérique
126	.....Petit Garrot	175	.....Faucon pèlerin	283	.....Goéland argenté	446	.....Moucheron phébi	601	.....Paruline à ailes dorées	661	.....Goglu des prés
124	.....Garrot à oeil d'or	211	.....Râle jaune	278	.....Goéland arctique	442	.....Tyran huppe	606	.....Paruline obscure	665	.....Carouge à épaulettes
125	.....Garrot d'Islande	209	.....Râle de Virginie	282	.....Goéland brun	433	.....Tyran tiri	607	.....Paruline verdâtre	662	.....Sturnelle des prés
140	.....Harle couronné	210	.....Marouette de Caroline	277	.....Goéland bourgmestre	567	.....Pie-grièche grise	584	.....Viréo mélodieux	664	.....Carouge à tête jaune
141	.....Grand Harle	214	.....Gallinule poule-d'eau	280	.....Goéland marin	576	.....Viréo à gorge jaune	583	.....Viréo de Philadelphie	675	.....Quiscalc rouilleux
142	.....Harle huppé	215	.....Fouille d'Amérique	297	.....Mouette de Sabine	579	.....Viréo à tête bleue	582	.....Viréo aux yeux rouges	678	.....Quiscalc bronzé
137	.....Érismature rousse	205	.....Grue du Canada	294	.....Mouette triaclyte	477	.....Mésangeau du Canada	612	.....Paruline à collier	679	.....Vacher à tête brune
201	.....Perdrix grise	228	.....Pluvier argenté	310	.....Sterne caspienne	478	.....Geai bleu	615	.....Paruline jaune	673	.....Orloie de Baltimore
84	.....Gélinotte huppée	227	.....Pluvier bronzé	302	.....Sterne de Dougall	488	.....Corneille d'Amérique	630	.....Paruline à flancs marron	703	.....Durbec des sapins
182	.....Tétras du Canada	221	.....Pluvier semipalmé	300	.....Sterne pierregarin	486	.....Grand Corbeau	616	.....Paruline à tête cendrée	699	.....Roselin pourpré
185	.....Lagopède des saules	222	.....Pluvier siffleur	301	.....Sterne arctique	467	.....Alouette hausse-col	617	.....Paruline tigrée	701	.....Roselin familier
190	.....Tétras à queue fine	225	.....Pluvier kildir	311	.....Gullette noire	475	.....Hirondelle noire	618	.....Paruline bleue	714	.....Bec-croisé des sapins
202	.....Dindon sauvage	243	.....Grand Chevalier	320	.....Mergule nain	469	.....Hirondelle bicoloré	619	.....Paruline à croupion jaune	715	.....Bec-croisé bifascié
004	.....Plongeon catmarin	244	.....Petit Chevalier	318	.....Guillemot mamette	471	.....Hirondelle à ailes hémisphères	623	.....Paruline à gorge noire	709	.....Sizerin flamme
001	.....Plongeon huard	240	.....Chevalier solitaire	319	.....Guillemot de Brünnich	473	.....Hirondelle de rivage	627	.....Paruline à gorge orangée	708	.....Sizerin blanchâtre
010	.....Grèbe à bec bigarré	242	.....Chevalier semipalmé	317	.....Petit Pingouin	473	.....Hirondelle à front blanc	633	.....Paruline des pins	710	.....Tarin des pins
006	.....Grèbe esclavon	239	.....Chevalier grivelé	321	.....Guillemot à miroir	472	.....Hirondelle rustique	636	.....Paruline à couronne rousse	711	.....Chardonneret jaune
005	.....Grèbe jougns	238	.....Maubèche des champs	330	.....Macareux moine	473	.....Hirondelle à front blanc	631	.....Paruline à poitrine baie	698	.....Gros-bec errant
015	.....Fulmar boréal	236	.....Courtis corlieu	341	.....Pigeon biset	472	.....Hirondelle rustique	626	.....Paruline azurée	655	.....Moineau domestique
017	.....Puffin majeur	263	.....Barge hudsonienne	345	.....Tourterelle triste			597	.....Paruline noir et blanc		
019	.....Puffin fuligineux			356	.....Coulcou à bec noir						
020	.....Puffin des Anglais			355	.....Coulcou à bec jaune						

**Dépôt des thèses**

23 MARS 2011