



HAL
open science

Modélisation du risque Influenza Aviaire dans l'écosystème de la Dombes, France

Alina Macacu

► **To cite this version:**

Alina Macacu. Modélisation du risque Influenza Aviaire dans l'écosystème de la Dombes, France. Médecine humaine et pathologie. Université de Grenoble, 2014. Français. ⟨NNT : 2014GRENS008⟩. ⟨tel-01557789⟩

HAL Id: tel-01557789

<https://theses.hal.science/tel-01557789v1>

Submitted on 6 Jul 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **MBS - Modèles, méthodes et algorithmes en biologie, santé et environnement**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Alina Macacu

Thèse dirigée par **Dominique J. Bicout**

préparée au sein **Unité de Biomathématiques et Epidémiologie, Equipe EPSP, Laboratoire TIMC-IMAG, VetAgro Sup Lyon**
et de **Ecole Doctorale Ingénierie pour la Santé, la Cognition et l'Environnement**

Modélisation du risque Influenza Aviaire dans l'écosystème de la Dombes, France

Thèse soutenue publiquement le **22 mai 2014**, devant le jury composé de :

M., Emmanuel Drouet

Prof., UJF, Président

M., Vittorio Guberti

DVM, ISPRA, Rapporteur

M., Benoît Durand

Dr., ANSES, Rapporteur

M., Marc Artois

Prof., VetAgro Sup Lyon, Examineur

Mme., Carole Fouque

IR, ONCFS, Examinatrice

Mme, Karine Chalvet-Monfray

Prof., VetAgro Sup Lyon, Examinatrice

Mme, Sophie Lubac

Dr., ITAVI, Examinatrice

M., Dominique J. Bicout

Dr., EPSP/TIMC, VetAgro Sup Lyon, Directeur de thèse



REMERCIEMENTS

JE voudrais tout d'abord exprimer mes plus profonds remerciements à mon directeur de thèse, Dominique J. Bicot, pour son encadrement ces dernières années. Ses conseils, son soutien, ses encouragements et sa confiance m'ont aidé à mener à bien ce travail de thèse.

Je voudrais remercier également les personnes ayant accepté de reviser ce travail : les rapporteurs Vittorio Guberti (ISPRA) et Benoît Durand (ANSES), ainsi que tous les membres du jury.

Je tiens à remercier Karine Chalvet-Monfray pour ses conseils concernant les modèles statistiques de mon travail, et Marc Artois pour ses avis pendant la rédaction d'un papier.

Je souhaite remercier l'ITAVI (Institut Technique de l'Aviculture) et l'ONCFS (Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage) d'avoir partagé des données sur les étangs, les oiseaux et les élevages de la Dombes. Je voudrai remercier également le centre de calcul de l'In2p3, grâce auquel maintes simulations ont pu être réalisées rapidement.

Je remercie chaleureusement tout les membres de l'unité Biomathématiques et Epidémiologie (EPSP-TIMC), au sein de laquelle j'ai travaillé ces dernières années. Merci aux directeurs de l'équipe, Philippe Sabatier et Anne Maître, pour leur accueil chaleureux. Merci à Martine Meyer pour son aide inestimable pour résoudre tous les problèmes administratifs et logistiques que j'ai pu rencontrer pendant ma thèse.

Merci aux personnes ayant partagé mon bureau pendant ces années, avec qui j'ai passé de nombreux bons moments : Aymen Mamlouk, Philippe Koné, Moussa Fané, Laetitia Marie dit Asse et Solange Sam. Une dédicace spéciale pour Anne-Laure Zilber, qui a apporté du bonheur et de la joie à la fin des longues journées de travail.

Je conclurai en remerciant de tout cœur Vishal Mungra d'avoir toujours été là pour moi, même dans les moments les plus difficiles.

Lyon, le 22 mai 2014.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	7
ACCRONYMES	11
PARTIE I - INTRODUCTION	1
1 INTRODUCTION - L'INFLUENZA AVIAIRE	1
1.1 LES VIRUS INFLUENZA AVIAIRE	1
1.2 L'INFLUENZA AVIAIRE	2
1.3 LES HÔTES	2
1.4 MODES DE TRANSMISSION	4
1.5 SITUATION INTERNATIONALE	4
1.6 LA PROBLÉMATIQUE DE LA DOMBES	8
1.7 OBJECTIFS	8
2 DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE : ÉCOSYSTÈME DE LA DOMBES	11
2.1 LE MILIEU NATUREL	13
2.2 L'AVIFAUNE	14
2.2.1 Canard Colvert	15
2.2.2 Fuligule Milouin	15
2.2.3 Cygne Tuberculé	16
2.3 LE CLIMAT	17
2.4 LES ÉLEVAGES	18
2.5 ÉPIZOOTIE INFLUENZA AVIAIRE DANS LA RÉGION	19
2.6 CONTACTS ENTRE L'AVIFAUNE SAUVAGES ET LES ÉLEVAGES DE VOLAILLES	21
PARTIE II - ECOSYSTÈME DE LA DOMBES	23
3 DYNAMIQUE DES ÉTANGS DE LA DOMBES	23
3.1 DÉFINITION D'UN ÉTANG	28
3.2 DYNAMIQUE DES ÉTATS D'UN ÉTANG	31
3.2.1 Les états d'exploitation	31
3.2.2 Modèles	32
3.2.3 Résultats et illustrations	34
3.3 DYNAMIQUE DE L'EAU D'UN ÉTANG	39

3.3.1	Données	39
3.3.2	Modèles	41
3.3.3	Résultats et illustrations	43
3.4	DYNAMIQUE D'UN ENSEMBLE D'ÉTANGS	47
3.4.1	Modèles	47
3.4.2	Résultats et illustrations	50
4	DYNAMIQUE SPATIO-TEMPORELLE DES OISEAUX DE LA DOMBES	61
4.1	MODÈLE GÉNÉRAL	63
4.2	DYNAMIQUE SPATIALE	64
4.2.1	Analyse préliminaire	64
4.2.2	Modèles	68
4.3	DYNAMIQUE TEMPORELLE	72
4.3.1	Les données	72
4.3.2	Analyse Préliminaire	75
4.3.3	Modèles	76
4.3.4	Résultats	79
	PARTIE III - RISQUE INFLUENZA AVIAIRE À L'ÉCHELLE D'UN ÉTANG	90
5	PERSISTANCE DES VIRUS INFLUENZA AVIAIRE DANS UN ÉTANG DE LA DOMBES	91
5.1	MODÉLISATION DE LA PERSISTANCE VIRALE	93
5.2	RISQUE INFLUENZA AVIAIRE DANS L'EAU D'UN ÉTANG	106
6	EFFET D'HÉTÉROGÉNÉITÉ ÉPIDÉMIOLOGIQUE DANS LA PROPAGATION DES VIRUS INFLUENZA AVIAIRE	113
7	RISQUE INFLUENZA AVIAIRE DANS L'ÉCOSYSTÈME D'UN ÉTANG	145
7.1	DESCRIPTION DU MODÈLE	147
7.1.1	Généralisation à plusieurs espèces	151
7.1.2	Risque d'infection des oiseaux à partir de l'eau	152
7.2	SIMULATIONS ET PARAMÈTRES	152
7.3	RÉSULTATS	155
7.3.1	Infection d'une seule espèce	155
7.3.2	Mélange des trois espèces	160
	PARTIE IV - RISQUE INFLUENZA AVIAIRE À L'ÉCHELLE DU RÉSEAU D'ÉTANGS DE LA DOMBES	165
8	RISQUE INFLUENZA AVIAIRE DANS LE RÉSEAU D'ÉTANGS	165
8.1	PRÉSENTATION DU MODÈLE	167
8.1.1	Construction du réseau	169
8.1.2	Propagation de l'infection sur les réseaux	172
8.2	RÉSULTATS	176
8.2.1	Propriétés des réseaux	176

8.2.2	Modèle à taux de transmission constant	183
8.2.3	Modèle à taux de transmission pondéré	189
9	RISQUE D'EXPOSITION DES ÉLEVAGES À L'INFLUENZA AVIAIRE	197
9.1	MODÈLE	199
9.1.1	Résultats	200
9.2	DISCUSSION	203
10	DISCUSSION, CONCLUSION GÉNÉRALE	207
10.1	SYNTHÈSE DES RÉSULTATS	207
10.2	L'INFLUENZA AVIAIRE DANS L'ÉCOSYSTÈME DE LA DOMBES	210
10.3	DISCUSSION SUR LES RÉSEAUX D'ÉTANGS	211
10.4	CONCLUSION	213
	BIBLIOGRAPHIE	217
A	ANNEXES	225
A.1	TABLES DE PROBABILITÉS DES ÉTATS D'UN ÉTANG	227
A.2	CARTES DE RÉPARTITION SPATIALE DES ESPÈCES SUR LES ÉTANGS	232
A.3	SIMULATIONS STOCHASTIQUES POUR LES MODÈLES SIR	241
A.4	GROUPEMENT SPATIAL DU RISQUE RELATIF D'INFECTION POUR LES ÉTANGS	242
A.5	RISQUE D'EXPOSITION DES ÉLEVAGES	246
A.6	PARAMÈTRES D'INFECTION IA	254
	VALORISATION DES TRAVAUX	261

ACCRONYMES

ONCFS	Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage
ITAVI	Institut Technique de l'Aviculture
OIE	Organisation mondiale de la santé animale
OMS	Organisation mondiale de la santé
IA	Influenza Aviaire
HP	hautement pathogène
FP	faiblement pathogène
E, P ou A	les états d'un étang eau, pêche ou assec, respectivement
WN	bruit blanc (white noise en anglais)
AR	modèle autorégressif
MA	modèle de moyenne mobile
ARIMA	modèle autorégressif, intégré, de moyenne mobile
c.à.d.	c'est à dire

INTRODUCTION - L'INFLUENZA AVIAIRE



1.1 Les virus Influenza Aviaire

L'Influenza aviaire est une maladie virale hautement contagieuse, touchant les oiseaux et susceptible d'entraîner une mortalité extrêmement élevée, notamment chez les volailles. Les agents pathogènes responsables de cette maladie sont les virus Influenza, qui sont des virus à ARN. Ils appartiennent à la famille des Orthomyxoviridae et au genre Influenzavirus. Il en existe trois types A, B et C distingués par l'antigénicité de leurs nucléoprotéines. Les virus grippaux de type A et B sont responsables des épidémies annuelles de grippe humaine. Seul les virus de type A sont capables d'infecter les oiseaux ainsi que de nombreuses autres espèces. Différents sous-types peuvent être distingués sur la base de leurs glycoprotéines de surface que sont l'hémagglutinine (HA ou H) et la neuraminidase (NA ou N). Il y a 16 sous-types d'hémagglutinine et 9 sous-types de neuraminidase pour les virus de type A. Ce sous-type donne 144 combinaisons possibles. Toutes existent chez les oiseaux mais avec des pathogénicités très variables [Swayne and Suarez, 2000]. Si l'infection par un sous-type donné donne une forme modérée de la maladie, entraînant une faible mortalité, nous parlons de l'Influenza Aviaire Faiblement Pathogène (IAFP). Si au contraire, les signes cliniques de la maladie sont graves, entraînant une mortalité massive, nous parlons de la forme Hautement Pathogène de la maladie (IAHP).

La définition de l'Union Européenne des virus Influenza aviaire hautement pathogènes est "une infection des volailles causée par tout virus influenza de type A ayant un indice de pathogénicité par voie intraveineuse (IPIV) supérieur à 1,2 (chez le poulet EOPS (à statut microbiologique contrôlé) âgé de six semaines), ou toute infection causée par des virus influenza de type A et de sous types H5 ou H7 pour lesquels le séquençage des nucléotides a prouvé la présence d'acides aminés basiques multiples au niveau du site de coupure de l'hémagglutinine" (Directive européenne 92/40/CEE, et JO (Journal officiel) arrêté du 8 juin 1994).

La souche IAHP H5N1 a émergé en 1996 en Chine et a montré une virulence et pathogénicité plus élevées que pour d'autres souches. Les virus IAHP H5N1 provoquent une maladie grave très grave chez le poulet, très contagieuse et mortelle. Ces souches ont un pouvoir pathogène assez élevé pour les oiseaux sauvages également et ont provoqué des cas d'infection et mortalité chez l'homme.

1.2 L'Influenza aviaire

L'Influenza aviaire est une zoonose. Les zoonoses sont des maladies transmissibles entre l'homme et l'animal [Acha and Szyfres, 1989]. La définition classique et historique est celle donnée par l'Organisation mondiale de la santé en 1959 et elle reste la plus souvent citée. Les zoonoses sont "les maladies et/[ou] les infections qui se transmettent naturellement des animaux [vertébrés] à l'homme et vice versa" [Palmer et al., 1998, Toma, 2004]. Cette définition met en évidence l'aspect de la **transmission** qui est essentiel aux zoonoses, les distinguant ainsi des maladies et infections communes aux hommes et aux animaux (e.g. le tétanos). En plus, selon la définition, la transmission doit se faire "naturellement", excluant ainsi les cas de bio-terrorisme utilisant des agents biologiques d'origine animale [Savey and Dufour, 2004].

La connaissance des zoonoses est encore très lacunaire. Nombreux virus pathogènes sont répertoriés chez l'homme et chez les espèces domestiques, mais il en existe probablement bien plus dans la faune sauvage. L'Influenza aviaire présente de nombreux variants et crée constamment et naturellement des souches mutantes. La circulation des humains et des animaux (d'élevage, domestiques) joue probablement un rôle majeur dans la diffusion et l'extension mondiale de l'IA. Cependant, le rôle des animaux sauvages n'est pas à négliger.

D'un point de vue de la santé publique, mais aussi économique, il est important de connaître au mieux les modalités de transmission et les réservoirs des zoonoses en général, et de l'influenza aviaire en particulier, ainsi que les paramètres (socio-économiques, climatiques, géographiques, etc.) qui pourraient amener des changements dans leur épidémiologie. En fonction de la catégorie de zoonoses, les mesures de lutte et de surveillance vont se focaliser sur des aspects différents. De manière générale, il est toujours indiqué de procéder à une veille épidémiologique des réservoirs, couplé avec une bonne connaissance des modalités de transmission.

1.3 Les hôtes

Avifaune sauvage

L'avifaune sauvage représente le réservoir naturel des virus influenza aviaire A. Il s'agit généralement de virus faiblement pathogènes, qui entraînent peu ou pas de symptômes et de mortalité chez ces oiseaux. Plusieurs souches différentes des virus IA peuvent circuler en même temps dans une même population d'oiseaux.

Les virus IAHP H₅N₁ sont capables d'infecter plus de 60 espèces d'oiseaux sauvages [Stallknecht and Brown, 2007]. Ces souches peuvent provoquer des symptômes sévères et la mort chez les oiseaux sauvages [Sturm-Ramirez et al., 2005]. La transmission peut avoir lieu même en absence de détection du virus dans les populations sauvages [Stallknecht and Brown, 2007]. Concernant les virus IAHP, les canards de surface en général, et les canards colverts en particulier, ont une prévalence beaucoup plus élevée que les autres espèces [Munster et al., 2005].

Les canards colverts sont considérés comme l'espèce réservoir des virus influenza aviare [Nishiura et al., 2009]. La prévalence IA dans les espèces d'oiseaux migratoires peut varier avec la saison et l'emplacement géographique [Stallknecht and Brown, 2007].

Les virus IA ont un taux élevé de mutations et ont la capacité d'échanger du matériel génétique entre sous-types, et des nouvelles souches sont créées par réassortiment. Des analyses génétiques de virus IAHP ont soutenu l'idée que ces virus ont leur origine dans l'avifaune sauvage. Lorsque les virus IA passent aux oiseaux domestiques, les virus FP peuvent être convertis en souches HP [Perdue et al., 1997, Suarez et al., 2004, Alexander, 2000].

Oiseaux domestiques

L'infection des volailles par l'IA peut arriver par contact avec des oiseaux sauvages infectés, ou par contact avec une source d'eau infectée ou une surface contaminée, ou par échanges commerciaux avec des volailles infectés. Des preuves génétiques, ainsi que des associations temporelles entre la prévalence d'IA dans l'avifaune sauvage et les épidémies dans les élevages de volailles, renforcent l'hypothèse de transmission de l'IA des populations d'oiseaux sauvages vers les oiseaux domestiques.

Les virus IAHP provoquent une maladie légère chez les volailles. Les taux de mortalité sont assez bas, ainsi que l'impact économique. En revanche, les virus hautement pathogènes provoquent une maladie très sévère chez les volailles (notamment pour le poulet), avec un fort taux de mortalité et des impacts économiques importants.

Les virus IA sont très contagieux chez les volailles, et l'infection peut se propager entre les élevages par les déplacements d'oiseaux infectés, d'équipements contaminés ou d'hommes ayant des chaussures ou vêtements contaminés.

L'homme

La majorité des virus influenza aviare n'infectent pas l'homme. Il existe cependant des souches qui ont engendré des cas d'infections graves chez l'homme comme les virus IAHP H5N1. La majorité de ces cas d'infection humaine par des virus IA, a eu lieu à cause des contacts directs ou indirects avec des volailles infectés (vivantes ou mortes) ou des environnements contaminés. Il n'existe aucune preuve que la maladie peut se propager à l'homme par le biais des aliments bien cuits (source : l'OMS).

Les virus IAHP H5N1 provoquent chez l'homme une maladie grave et agressive, avec des taux de mortalité élevés (supérieurs aux taux de mortalité des infections avec la grippe saisonnière). L'utilisation des médicaments antiviraux peut augmenter les chances de survie.

D'autres sous-types de virus de la grippe aviare, comme H7N7 et H9N2, ont également infecté l'homme, causant généralement une maladie bénigne, avec quelques cas très sévères et parfois mortels. En Mars 2013, la souche H7N9 a émergé en Chine, causant depuis des infections

répétées chez les oiseaux et les hommes. La maladie causé par ce virus chez l'homme est, dans la plupart des cas, très grave. La majorité des personnes ayant été infectés ont été en contact avec des volailles ou milieux contaminés et la transmission d'homme à homme n'a pas été signalée.

Les virus IA ne se répliquent pas de manière efficace chez l'homme et autres mammifères. Il est possible que des virus influenza aviaire et influenza humaine co-existant dans un même mammifère forment une nouvelle souche, par réassortissement, qui soit très pathogène pour l'homme [Clark and Hall, 2006]. Les craintes d'une pandémie peuvent devenir réalité si cette souche acquière le pouvoir de transmission d'homme à homme. Les virus du sous-type H5N1 HP sont un bon candidat pour une éventuelle pandémie.

1.4 Modes de transmission

La transmission de l'IA se fait par contact direct entre un individu sain et un individu infecté, ou par un vecteur mécanique ou un support passif où l'agent pathogène ne se modifie pas (contact d'un individu sain avec une eau ou une surface contaminée). Dans le premier cas, il s'agit de la voie de transmission directe, et dans le deuxième de la voie de transmission indirecte.

La propagation des virus IA peut se faire par contact direct avec les sécrétions des oiseaux infectés. Les virus IAHP et la majorité des virus IAHP sont excrétés majoritairement par le cloaca ; à l'exception des virus IAHP des souches asiatiques H5N1 qui sont excrétés plus par voie nasale et trachéale [Pantin-Jackwood and Swayne, 2007, Kishida et al., 2005, Hulse-Post et al., 2005]. Les oiseaux infectés excrètent les virus dans l'eau et d'autres individus peuvent s'infecter à partir de consommation d'eau contaminée. Les virus IA peuvent persister dans l'eau plusieurs jours, voire mois, en fonction de la souche virale, la température, salinité, pH et autre paramètres bio-physiques de l'eau. A températures basses, les virus persistent plus longtemps.

La propagation de l'infection dans l'espace est facilitée par les échanges commerciaux d'oiseaux infectés, les déplacements d'oiseaux sauvages, les déplacements des hommes entre les fermes (les virus étant transportés par des chaussures, vêtements ou équipements contaminés).

1.5 Situation internationale

Le virus IAHP H5N1 a émergé en 1996 en Chine. En 2003, 2004 il s'est propagé rapidement en Chine et autres pays d'Asie, dont Vietnam, Thaïlande, Laos, Cambodge, Indonésie, Japon, Corée du Sud. Arrivé 2005/2006 le virus IAHP H5N1 avait atteint Europe, touchant la France en février 2006.

Des épidémies d'IA continuent à avoir lieu dans le monde. La Figure 1.1 montre le nombre d'épizooties IAHP H5N1 déclarées dans les populations de volailles domestiques, de 2003 à 2014, dans le monde. Les virus H5N1 restent endémiques dans plusieurs régions du monde. La Figure 1.2 montre les foyers d'infection IAHP dans le monde, de 2005 à 2014, pour les populations d'oiseaux sauvages, ainsi que pour les volailles.

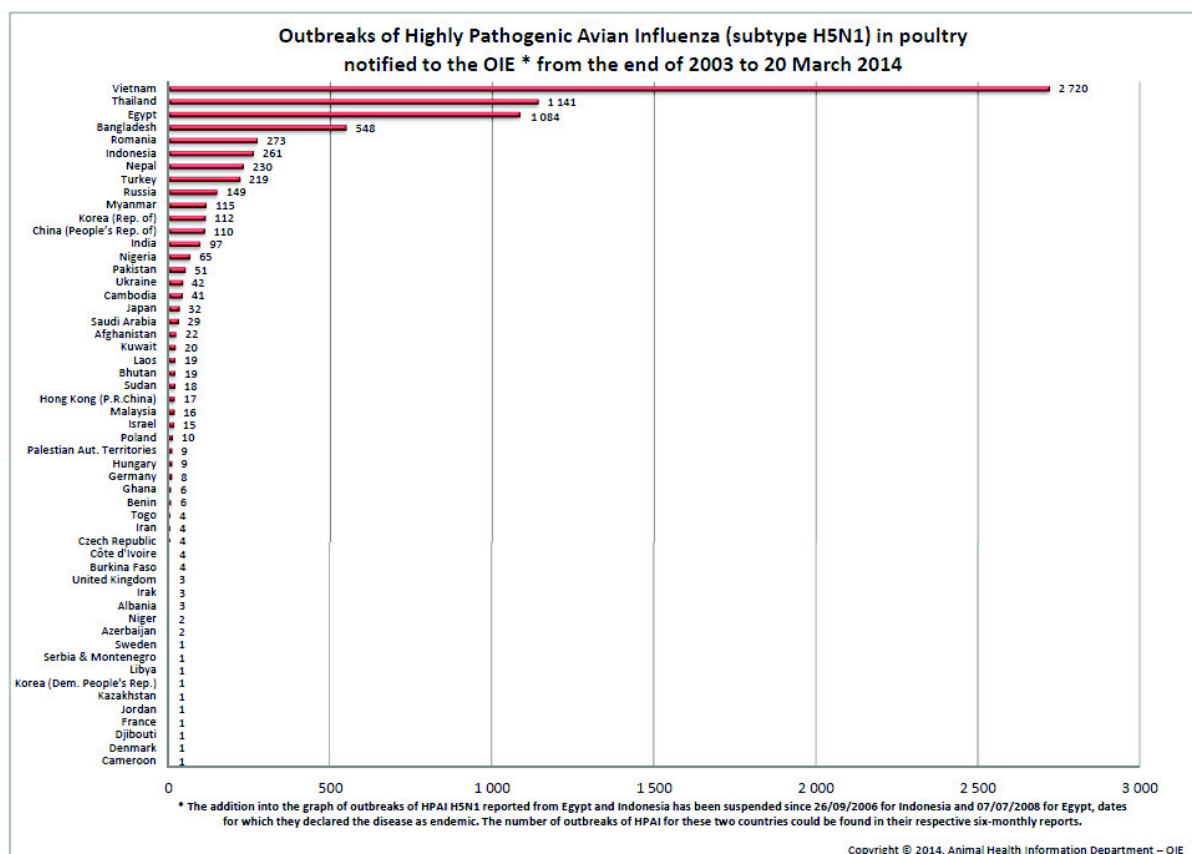


FIGURE 1.1 – Épizooties de IAHP H5N1 signalées de 2003 à 2014 dans le monde. Source site de l'OMS.

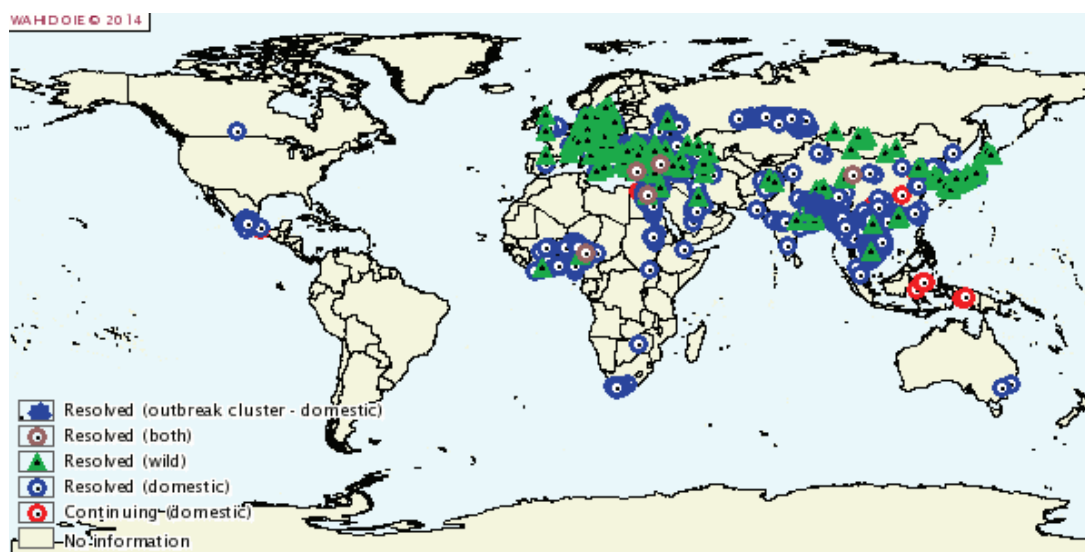


FIGURE 1.2 – Foyers d'infection IAHP dans le monde, de 2005 à 2014, pour les populations d'oiseaux sauvages, ainsi que pour les volailles. Source site de l'OIE.

Risques de santé publique

Des centaines de cas d'infection humaine par les virus IAHP H5N1 ont été signalés depuis la réémergence de ces virus en 2003 et jusqu'en 2013, deux tiers de ces cas ayant entraîné la mort. La Figure 1.3 montre les pays ayant signalé des cas d'infection humaine de 2003 à 2013, et indique le nombre d'infectés et de décès pour ces pays.

Areas with confirmed human cases for avian influenza A(H5N1) reported to WHO, 2003-2013*

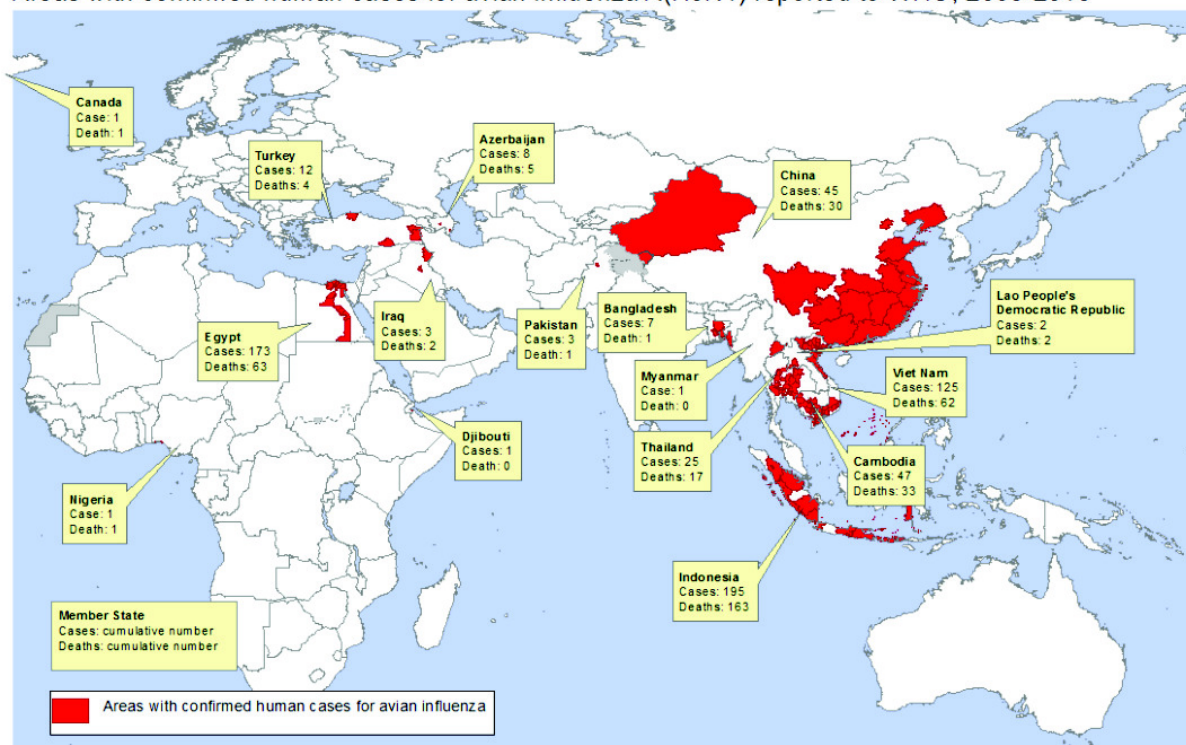


FIGURE 1.3 – Cas d'infection humaine par le virus IAHP H5N1 dans le monde. Source : site de l'OMS.

En mars 2013, une autre souche de virus influenza aviaire, H7N9 faiblement pathogène, a traversé la barrière des espèces, infectant 3 personnes en Chine. Les virus IAHP H5N1 continuent à provoquer des épizooties chez les volailles, et chez les oiseaux sauvages, et constituent toujours un danger pour la santé publique. La possibilité qu'une souche IAHP mute et deviennent transmissible entre les hommes est inquiétante, une telle souche pouvant causer une pandémie de sévérité importante. Les souches IAHP H5N1 sont particulièrement surveillées pour leur potentiel pandémique, car elles continuent à circuler dans certaines parties du monde, elles provoquent une maladie grave chez l'homme, avec des taux de mortalité élevés, et parce que les hommes ont peu (ou pas) d'immunité contre ces virus.

Mesures réglementaires

Face à une infection d'IA hautement pathogène sur un ou plusieurs élevages/fermes, différentes mesures sont à mettre en place : isolation des établissements touchés, l'abattage des oiseaux sur les fermes infectés et sur les fermes avoisinantes, restrictions commerciales, niveaux de biosécurité plus élevés et parfois vaccination.

En amont d'une épidémie, des efforts de surveillance et prévention sont importants. La prévalence de l'IA chez les oiseaux sauvages est surveillée, ainsi que la présence de l'infection à l'IA

chez les volailles, pour pouvoir détecter une épidémie le plus tôt possible. Les producteurs de volailles doivent notifier les oiseaux morts et malades. Ils peuvent réduire le risque que leurs fermes soient infectées, en limitant les contacts avec les oiseaux sauvages, respectant les mesures de biosécurité, contrôler l'accès des personnes et des équipements et veiller à ne pas abreuver les oiseaux avec de l'eau contaminée.

1.6 La problématique de la Dombes

Le 17 février 2006, le premier oiseaux mort à cause d'une infection avec le virus IAHP H₅N₁, est signalé en France, en Dombes. La Dombes est une zone humide dans le département de l'Ain, parsemée par plus de 1000 étangs, et une zone ornithologique d'importance internationale. Un nombre important d'élevages de volailles est présent dans la région. Le Chapitre 2 de ce memoire présente en détail les caractéristiques de cette région.

L'épizootie a duré 64 jours et a touché principalement l'avifaune sauvage. Dans l'avifaune domestique, un seul élevage (de dindes) a été signalé comme infecté. L'épizootie a été considérée de faible ampleur. Néanmoins, cet épisode a engendré la restriction d'accès à certains étangs et la mise en place des zones de sécurité et de surveillance autour des foyers d'infection, résultant dans des pertes économiques pour la région. L'analyse spatio-temporelle de cette épizootie s'inscrit dans les travaux de thèse de [Doctrinal, 2009].

L'écosystème des étangs, sur lesquels les oiseaux d'eau nidifient et hivernent, couplé avec l'épisode d'infection IAHP H₅N₁ de 2006, font de la Dombes une région à risque pour l'influenza aviaire. La proximité des étangs et de l'avifaune sauvage, des élevages de volailles dans la région, constitue une source d'inquiétude quant au risque de propagation de l'IA des populations sauvages vers les populations d'oiseaux domestiques.

La problématique de ce travail a été de conduire une évaluation du risque influenza aviaire en Dombes. Un premier risque existe du point de vue de la circulation des virus IA dans les populations d'oiseaux sauvages sur les étangs et entre les étangs. Un deuxième risque concerne les contacts entre l'avifaune sauvages et les élevages de volailles, et la probabilité que les élevages soient touchés par une infection IA circulant sur les étangs.

1.7 Objectifs

L'objectif principal de ce travail est la modélisation du risque influenza aviaire dans la région de la Dombes, pour l'écosystème des étangs, l'avifaune sauvage et les élevages de volailles. Ce travail est axé sur l'avifaune sauvage et sur le risque d'infection et de transmission de l'infection par les oiseaux sauvages. Nous avons, dans un premier temps, identifié les caractéristiques particulières à la Dombes, pouvant influencer sur l'épidémiologie de l'influenza aviaire dans la région. Les trois acteurs principaux de l'écosystème de la Dombes sont les étangs, les populations d'oiseaux sauvages et les élevages de volailles.

Ensuite, le risque influenza aviaire dans la Dombes a été décliné à deux niveaux : 1) dans l'écosystème d'un seul étang ; 2) sur un réseau d'étangs, entre lesquels l'infection peut se propager. Le risque d'exposition des élevages aux virus influenza aviaire circulant dans l'avifaune sauvage a également été analysé.

La Figure 1.4 représente l'organigramme des chapitres de ce mémoire, identifiant les éléments importants à l'analyse du risque influenza aviaire en Dombes, ainsi que les relations entre eux. Les flèches indiquent la dépendance des connaissances nécessaires aux analyses effectués dans un chapitre donné. Pour faciliter une vision d'ensemble ainsi que la lecture du mémoire, au début de chaque chapitre, cet organigramme est repris, en mettant en évidence seulement les éléments utilisés dans le chapitre en question.

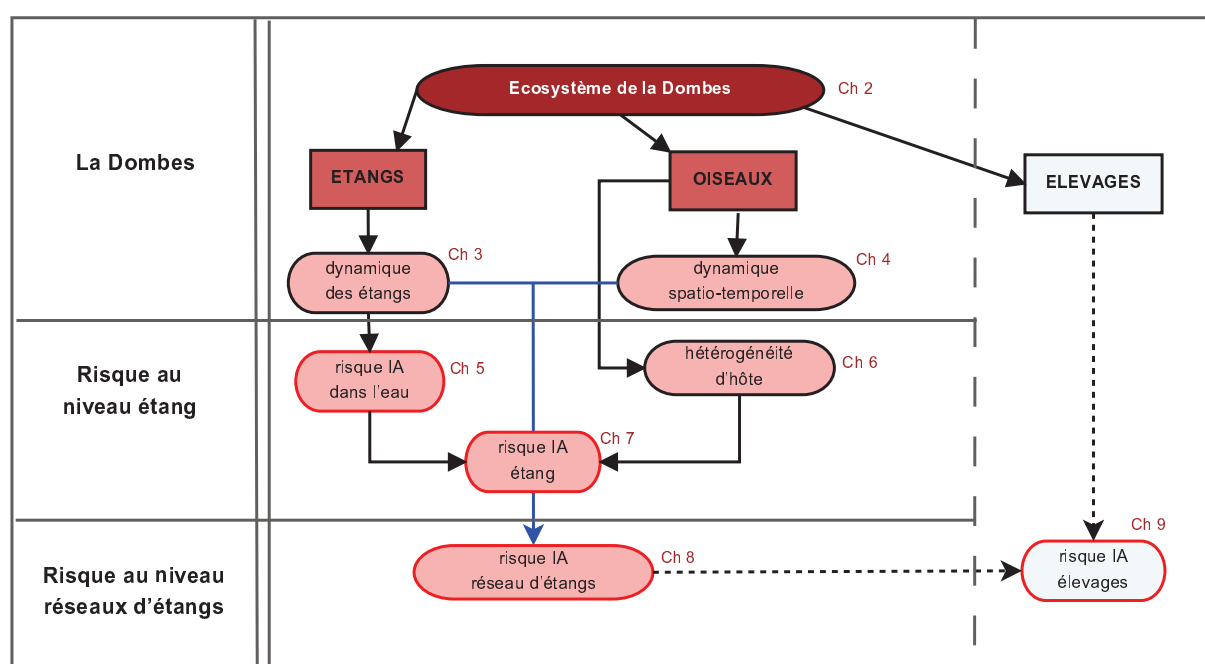


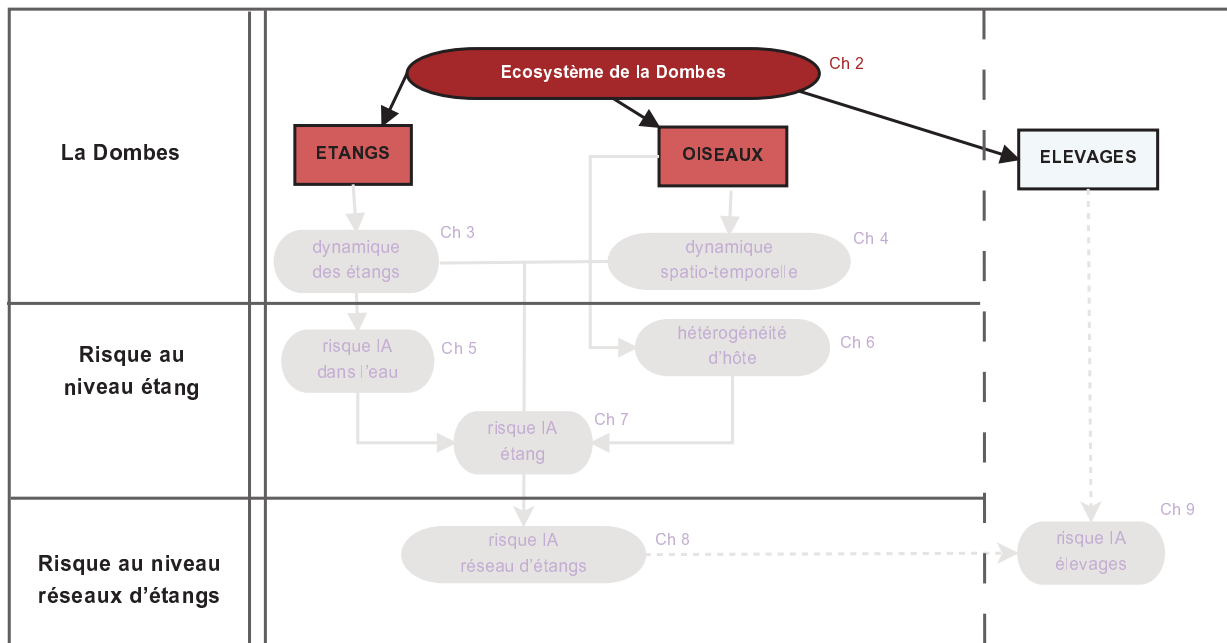
FIGURE 1.4 – Organigramme des chapitres du mémoire.

DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE : ÉCOSYSTÈME DE LA DOMBES

2

"La Dombes a une histoire, culturelle, spirituelle, une vocation artistique, mais la Dombes des hommes, celle d'aujourd'hui, reste foncièrement agricole, piscicole, cynégétique... et gastronomique. Et puis il y a la "Dombes sauvage", la Dombes de la nature, la Dombes scientifique : la faune et la flore inféodées aux milieux humides y sont précieuses et passionnantes !"

Charles A. Vaucher



Figures

2.1	La région de la Dombes	13
2.2	La pêche en Dombes.	14
2.3	Canard colvert	15
2.4	Fuligule milouin.	16
2.5	Cygne tuberculé.	17
2.6	Températures et précipitations moyennes en Dombes.	18
2.7	Les étangs et les élevages de la Dombes.	19
2.8	La chronologie de l'infection des étangs lors de l'épizootie de 2006.	20
2.9	Les étangs infectés lors de l'épizootie de 2006.	20

2.1 Le milieu naturel

La Dombes est un plateau argileux d'environ 100 000 hectares, situé dans le département de l'Ain, à une trentaine de km au nord-est de Lyon. Trois fleuves, le Rhône au sud, l'Ain à l'est et la Saône à l'ouest, entourent la zone humide de la Dombes (Figure 2.1).

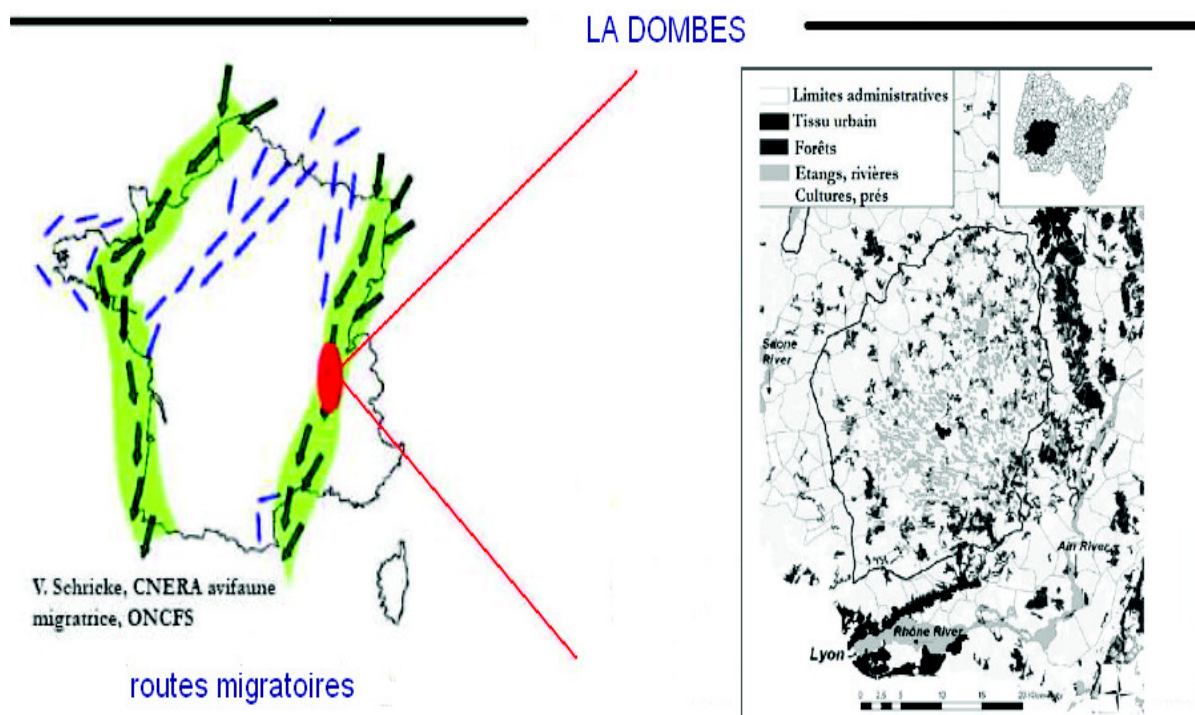


FIGURE 2.1 – A gauche : situation géographique de la Dombes, sur une des deux routes migratoires principales traversant la France. A droite : détails topographiques de la Dombes. Source : modification d'après [Schricke, 1989] et [Pradel, 2009]

Parsemée par plus de 1400 étangs d'origine anthropique, la Dombes est aussi appelée "le pays aux 1000 étangs". Les étangs font partie du réseau Natura 2000 et sont classés ZNIEFF (zone d'intérêt écologique, faunistique et floristique). Ces étangs ont été construits au XI^{ème} siècle par des moines, pour exploiter le terrain argileux qui s'y trouve. Le sol, de nature argileuse, a un caractère imperméable en saison humide, mais absorbant en saison sèche. "[...] la Dombes sèche est un véritable papier buvard qui absorbe les petites pluies avec l'avidité d'une roche perméable tandis que la Dombes « mouillée » interdit toute infiltration dès que l'argile est saturée : en un mot, le pays le plus perméable quand il est sec, le plus imperméable quand il est humide." [Avocat, 1975]

Le seul apport en eau dans la région sont les précipitations, seulement quelques (grands) étangs étant reliés à un cours d'eau. Dans un souci de conservation d'eau, la plupart des étangs sont reliés entre eux, rendant possible des échanges d'eaux lors des vidanges d'un

(hérons), *Limicoles* (chevaliers, vanneaux, bécassines,...), *Rallidés* (râles, foulques) et *Podicipidés* (grèbes). Nous portons un intérêt particulier aux Anatidés, notamment aux canards colverts (*Anas platyrhynchos*), fuligules milouins (*Aythya ferina*) et cygnes tuberculés (*Cygnus olor*); trois espèces qui sont hôtes potentiels aux virus IA en Dombes.

2.2.1 Canard Colvert

Le canard colvert est l'espèce la plus abondante et la plus présente dans la Dombes. C'est un oiseau peu farouche, qui craint peu l'homme. Il appartient au groupe des canards barboteurs, ou de surface, qui préfèrent s'alimenter en surface, ou à faible profondeur d'eau. Il s'aventure aussi sur des prairies pour brouter. Il est omnivore et se nourrit de poissons et d'herbes, de graines et de vers, de grenouilles et d'insectes. Le colvert représente en moyenne 91% du total des canards de surface de la Dombes [Bernard and Lebreton, 2007].

Le canard colvert est sensible à l'infection par le virus IAHP H₅N₁, et, une fois infecté, peut excréter le virus, sans présenter des symptômes et sans en mourir [Keawcharoen et al., 2008]. Le canard colvert semble donc être le meilleur véhicule à longue distance de ces virus. Il est également espèce réservoir pour une multitude de souches des virus IA faiblement pathogènes.

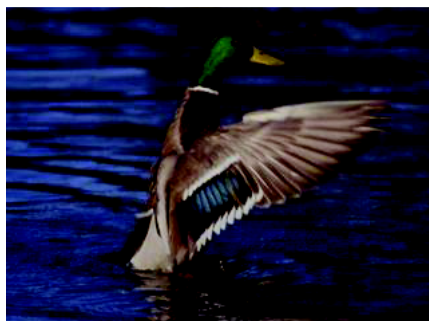


FIGURE 2.3 – Canard colvert. Source site web : <http://www.oncfs.gouv.fr/Connaitre-les-especes-ru73/Le-Canard-Colvert-ar646>,

consulté le 31 mars 2014.

2.2.2 Fuligule Milouin

Le fuligule milouin est un canard plongeur, qui, comme son nom l'indique, trouve sa nourriture en plongeant depuis la surface. Il préfère se nourrir en eau claire, entre 1 et 3,50 mètres de profondeur mais il peut aussi se contenter de barboter en eau peu profonde. C'est un oiseau grégaire, qui forme de larges bandes en hiver.

Les effectifs des fuligules milouins en Dombes augmentent dès la fin du mois de janvier, avec l'arrivée des migrateurs. Le gel est un facteur limitant pour cette espèce, ses effectifs pendant les années très froides étant plus faibles. Le milouin représente en moyenne 93% du total des canards plongeurs de la Dombes. Le fuligule milouin et le canard colvert constituent plus de trois quarts des contingents d'oiseaux, tout en permutant leurs importances relatives entre belle et mauvaise saisons [Bernard and Lebreton, 2007].

C'est une espèce sensible à l'infection par les virus IA faiblement pathogènes et hautement pathogènes. Les fuligules milouins infectés excrètent les virus, en absence ou présence des symptômes. Après la période infectieuse, une partie des fuligules milouins ayant été infectés meurt, et une partie se rétablit.

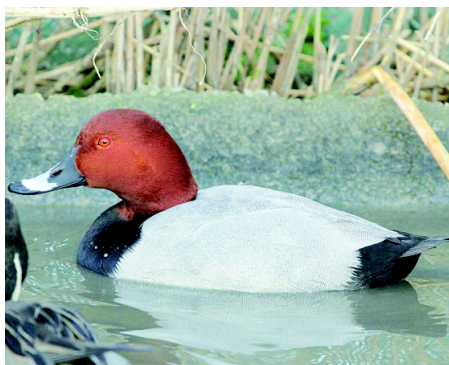


FIGURE 2.4 – *Fuligule milouin*. Source site web :

<http://www.fermedebeaumont.com/fuligule-milouin-deurope-p-805.html>, consulté le 31 mars 2014.

2.2.3 Cygne Tuberculé

Le cygne tuberculé a niché pour la première fois en Dombes en 1976 (un couple). Depuis, ses effectifs ont constamment augmenté, jusqu'à 60 couples reproducteurs en 2005. La population totale de cygnes tuberculés en Dombes est bien plus importante, avec la présence des migrateurs, atteignant plus de 1000 adultes en 2005 [Bernard and Lebreton, 2007].

Le cygne tuberculé préfère les plans d'eau dont la profondeur lui permet d'atteindre le fond (jusqu'à un mètre) avec son long cou. Le cygne tuberculé se nourrit aussi au sol de plantes terrestres, de graminées et de quelques invertébrés (petits escargots, limaces ou insectes mangés avec les feuilles qu'il ingère). Il utilise trois méthodes pour se nourrir : l'alimentation en surface, le plongeon de la tête et du cou et le plongeon du corps.

Cette espèce semble être très sensible à l'infection par le virus IAHP H₅N₁. Lors de l'épisode de l'influenza aviaire qui a eu lieu en Dombes en 2006, ce sont surtout les cygnes tuberculés qui ont été retrouvés morts sur les étangs à cause de la maladie.

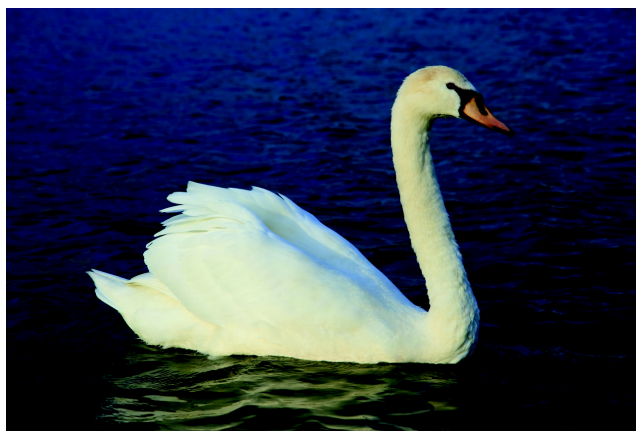


FIGURE 2.5 – *Cygne tuberculé*. Source site web http://fr.wikipedia.org/wiki/Cygne_tubercul%C3%A9, consulté le 31 mars 2014.

2.3 Le climat

A cause de son emplacement géographique, la Dombes se trouve soumise à des influences climatiques nordiques et méditerranéennes, continentales et océaniques. Le climat de la Dombes est caractérisé par des hivers secs et froids, avec des températures entraînant souvent le gel, et des automnes pluvieux. De novembre à mars la quantité de précipitations est supérieure à l'évaporation, alors que de juin à août c'est l'inverse, entraînant une sécheresse estivale [Bernard and Lebreton, 2007, Lebreton et al., 1991]. Lors d'épisodes de températures extrêmes en été, et compte-tenu de leur faible profondeur, les étangs courent le risque d'un assèchement au moins partiel. En été, la température des eaux des étangs peut être supérieure à 20°C, avec une évaporation intense, pouvant atteindre jusqu'à 2cm par jour [Avocat, 1975].

La station météorologique de Marlieux est bien représentative de la Dombes des étangs. Dans [Bernard and Lebreton, 2007], une étude sur les 43 dernières années indique une hausse thermique significative, mais pas d'évolution pluviométrique générale. L'échauffement est présent sur toute l'année, sauf le mois de février, mais son ampleur diffère selon les saisons : hausse mensuelle moyenne de 2.5°C en été, 1°C en hiver, 2°C au printemps et 1.7°C en automne. Le gel reste aléatoire, malgré le réchauffement climatique.

La même étude trouve que le mois d'octobre devient le plus humide et que la majorité des précipitations ont lieu en automne. *"Cette évolution climatique est de moins en moins propice aux périodes de pêche et de remise en eau : les pluies d'automne sont trop tardives pour "nourrir" le poisson, mais trop précoces pour remplir les étangs ; un hiver et un printemps relativement secs ne peuvent alors pas grande chose pour restaurer la situation et sauver la mise. [Bernard and Lebreton, 2007]"*

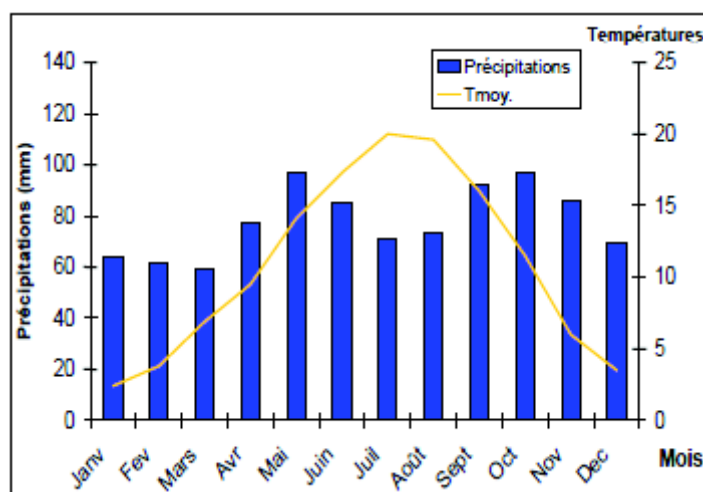


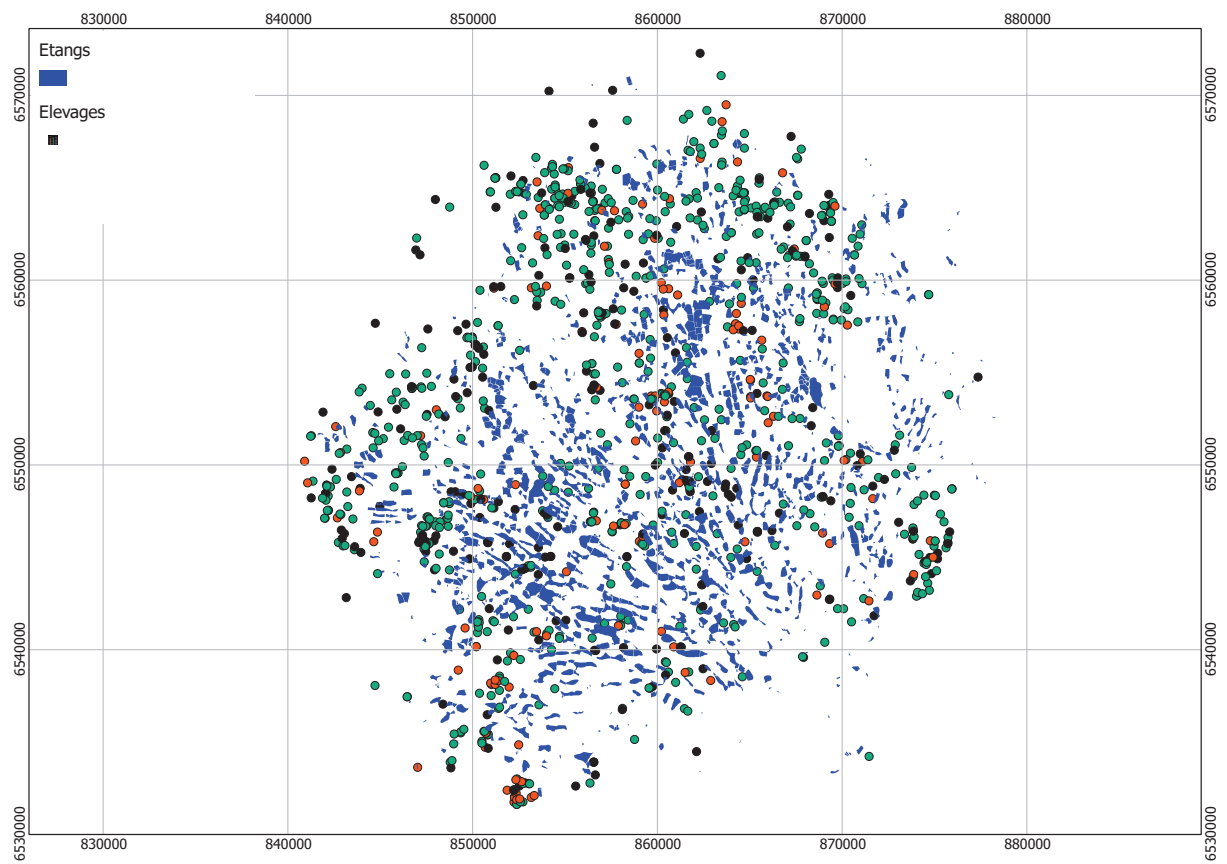
FIGURE 2.6 – Températures mensuelles moyennes et cumul des précipitations en Dombes (station météorologique de Marlieux), de 1971 à 2000. Source [Pradel, 2009]

2.4 Les élevages

L'écosystème de la Dombes est une symbiose entre l'homme et la nature. Dans l'écosystème des étangs, une grande biodiversité animale et végétale est présente. Les hommes interagissent avec cet écosystème par leur gestion des étangs, la pratique de la pêche et de la chasse.

La région est également reconnue pour son nombre important d'élevages de volailles en plein air (filiales "Label Rouge", "AOC Poulet de Bresse"). Trois types d'élevages existent : avec parcours, en claustration, ou mixte. Les espèces élevées sur ces fermes sont variées : poulets, dindes, canards et autres. Du fait de la proximité des fermes aux étangs, il existe un risque potentiel de transmission de l'IA de l'avifaune sauvage vers les volailles domestiques, par des contacts directs et/ou indirects. En effet, les élevages avec parcours peuvent attirer des oiseaux sauvages (présence de nourriture ou appels des oiseaux domestiques) et s'exposer au risque d'introduction de la maladie par l'avifaune sauvage. Cette introduction peut se faire soit par transport de la matière infectée sur le parcours, soit par contact direct avec des oiseaux d'eau sauvages infectés. L'existence des espèces "relais" est également possible, des oiseaux sauvages plus petits que les oiseaux aquatiques, qui, par leur contact avec un oiseau d'eau infecté s'infectent, et ensuite entrent en contact et propagent l'infection aux oiseaux domestiques.

La Figure 2.7 montre l'emplacement des élevages et des étangs de la Dombes, dans une projection Lambert93. Les données sur les étangs nous proviennent de l'ONCFS (Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage) et les données sur les élevages de la Direction des services vétérinaires de l'Ain.



épidémique différente [Doctrinal et al., 2009]. Les cygnes tuberculés ont été l'espèce avec le plus grand nombre de mortalités, alors que les fuligules milouins ont été moins touchés. Il est également possible qu'une infection asymptomatique des canards colverts ait aussi eu lieu, cette espèce ayant été trouvée excrétrice mais asymptomatique lors des expérimentations en laboratoire [Keawcharoen et al., 2008].

L'introduction du virus dans la Dombes reste un sujet ouvert à la discussion. Dans [Le Gall-Reculé et al., 2008], les auteurs indiquent que deux souches différentes de H5N1 circulaient en même temps lors de l'épizootie de 2006. Ceci justifierait soit une double introduction du virus dans la région, soit une simple introduction suivie par une mutation du virus.

2.6 Contacts entre l'avifaune sauvages et les élevages de volailles

L'épizootie de 2006 soulève des interrogations quant au risque de transmission de l'infection des populations d'oiseaux sauvages aux élevages de volailles. Des études ont été menées pour quantifier les contacts entre les oiseaux sauvages et les élevages de volailles ayant des parcours [Lubac et al., 2012, Rieutort, 2011]. Les oiseaux d'eau, dont le canard colvert, ont été trouvés ne pas avoir des contacts directs avec les parcours de volailles. Le lien entre les oiseaux et les élevages peut être fait par des oiseaux "relais", qui fréquentent les deux milieux (étangs et parcours). Les espèces "passerelles" tombent dans cette catégorie, incluant le héron cendré (*Ardea cinerea*), la tourterelle turque (*Streptopelia decaocto*) et le pigeon biset (*Columba livia domesticus*), qui présente le plus élevé risque de transmission par contact avec les volailles. L'épidémiologie de l'IA chez ces oiseaux est cependant moins bien connue que pour les oiseaux d'eau, connus pour leur susceptibilité et statut de réservoirs.

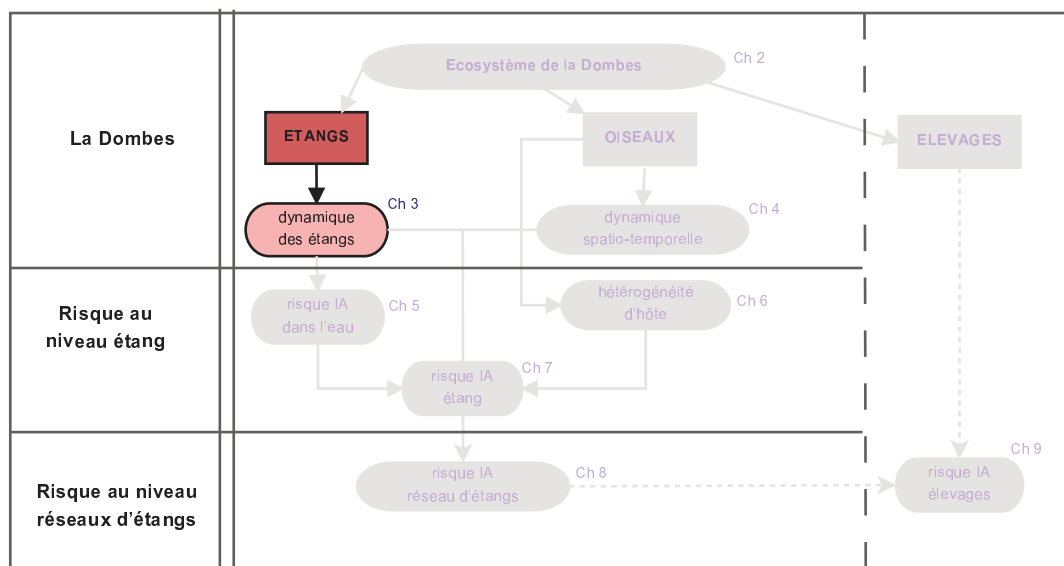
Les oiseaux d'eau fréquentent d'autres milieux que les étangs, comme les rivières, qui sont également visités par d'autres espèces d'oiseaux qui peuvent avoir des contacts avec les parcours de volailles. Ceci crée une voie de contact indirecte entre les oiseaux d'eau et les volailles.

DYNAMIQUE DES ÉTANGS DE LA DOMBES 3

Les étangs de la Dombes sont l'élément central de cette région. Ils représentent un milieu important pour la propagation des maladies, car un étang est propice au développement des vecteurs de maladies, abrite des nombreuses espèces d'oiseaux qui agissent comme hôtes, et permet la persistance des virus dans l'environnement. La pratique d'exploitation des étangs dans la Dombes fait que les étangs suivent une dynamique particulière dans le temps, alternant entre trois états d'exploitation : eau, pêche, assec.

Dans ce chapitre, la dynamique d'un étang dans le temps est modélisée, dans le but de pouvoir estimer à tout moment les caractéristiques d'un étang. Un étang étant caractérisé par son état d'exploitation, son niveau d'eau et sa surface d'eau, nous proposons ici des modèles décrivant l'évolution de ces variables dans le temps. De plus, un modèle plus général est mis en place, représentant les étangs de la Dombes sous la forme d'un ensemble d'étangs interconnectés.

Dans le contexte des maladies infectieuses, la première étape de l'étude, caractériser un étang individuel, est importante pour l'analyse des foyers d'infection, alors que la deuxième étape, caractériser un ensemble d'étangs interconnectés, est importante pour l'analyse de la propagation spatiale de l'infection.



Figures

3.1	Schéma simplifié de la forme d'un étang.	29
3.2	Carte des étangs de la Dombes.	30
3.3	Diagramme convention pas de temps entre transitions d'états	32
3.4	Transitions possibles entre les états des étangs.	33
3.5	Distributions des durées des états E, P et A.	35
3.6	Distribution des dates de transition vers E.	35
3.7	Distribution des dates de transition vers A.	36
3.8	Distribution des dates de transition vers P.	36
3.9	Evolution dans le temps des états d'un étang.	37
3.10	Auto-corrélations et corrélations croisées.	38
3.11	Probabilité de survie d'un étang dans l'état E.	38
3.12	Illustration niveau moyen d'eau.	40
3.13	Courbes des niveaux d'eau d'un étang.	42
3.14	Diagramme de la forme d'un étang	43
3.15	Distribution des surfaces maximales de la Dombes.	45
3.16	Surface d'eau moyenne pour une année en E.	46
3.17	Sensibilité des variations de la surface d'eau.	46
3.18	Diagramme calcul $g(r)$	48
3.19	Fonction de distribution radiale.	51
3.20	Distribution des distances jusqu'au plus proche voisin.	51
3.21	Distribution des altitudes des étangs.	52
3.22	Carte des altitudes des étangs.	52
3.23	Carte plus proches voisins.	53
3.24	Carte 10% d'étangs connectés.	54
3.25	Carte 25% d'étangs connectés.	54
3.26	Carte 50% d'étangs connectés.	55
3.27	Carte du niveau d'eau sans connexions (ex : en Septembre).	56
3.28	Carte du niveau d'eau avec connexions (ex : en Septembre).	56
3.29	Fonction de distribution radiale pour différents états.	57
3.30	Carte du niveau d'eau avec 10% connexions (ex : en Septembre).	58
3.31	Carte du niveau d'eau avec 25% connexions (ex : en Septembre).	59
3.32	Carte du niveau d'eau avec 50% connexions (ex : en Septembre).	59

Tableaux

3.1	Définitions des propriétés physiques d'un étang.	28
3.2	Définitions des propriétés d'exploitation d'un étang.	29
3.3	Définitions des propriétés géographiques d'un étang.	30
3.4	Définitions des notations	40
3.5	Niveaux relatifs moyens d'eau d'un étang	42
3.6	Variations du niveau d'eau en fonction des changements d'état	44
3.7	Changements d'état en fonction des variations du niveau d'eau.	44
3.8	Règles d'échanges d'eau entre voisins connectés.	50

Les étangs jouent un rôle important dans l'épidémiologie des zoonoses qui affectent les oiseaux d'eau, comme l'influenza aviaire, ou encore le West Nile. Ils représentent le milieu où les hôtes (les oiseaux aquatiques) recherchent de la nourriture, hivernent, construisent leurs nids, et, plus généralement, effectuent leurs activités quotidiennes. Les étangs sont aussi des conteneurs de virus, la persistance de certains virus, comme l'influenza aviaire, dans l'eau des étangs étant possible [Stallknecht and Brown, 2009, Zarkov, 2006, Brown et al., 2009].

Les étangs étudiés ici, les étangs de la Dombes (cf. Chapitre 1), sont des étangs artificiels, qui ont commencé à être créés par les moines dès le 14^{ème} siècle. Pour assurer une exploitation optimale des terres argileuses de cette région, une pratique d'exploitation des étangs propre à la Dombes est mise en place : alternance entre mise en eau (évolage) et mise à sec (assec) des étangs. Grâce à ce système, un étang peut, à tout moment, se retrouver dans un de trois états : eau, pêche ou assec. En fonction de l'état dans lequel il se trouve, un étang est exploité différemment et a des caractéristiques différentes. Un étang en eau a un niveau et une surface d'eau importants et il est attirant en tant qu'abri pour les oiseaux. Un étang peut rester en eau plusieurs mois consécutifs. L'état pêche dure seulement un ou deux mois, temps pendant lequel le niveau d'eau est bas. Pendant l'état assec, un étang est complètement séché, l'absence d'eau entraînant une absence de virus et d'oiseaux (les oiseaux comme les canards colverts, peuvent se déplacer sur les étangs en assec cultivés en quête de nourriture). L'état assec dure généralement un an ou plus.

L'alternance de ces états dans le temps crée une dynamique des étangs, du point de vue des états et de l'eau, car les deux sont étroitement liés. La connaissance de l'état et du niveau d'eau d'un étang est une étape importante dans l'étude de l'épidémiologie des zoonoses dans une région comme la Dombes, car les mouvements et la distribution d'oiseaux et la persistance des virus dans l'environnement en dépendent. Après une première partie où la définition d'un étang est établie, la deuxième et la troisième partie de ce chapitre sont consacrées à la modélisation de la dynamique des états et de l'eau d'un étang, respectivement.

La dernière partie du chapitre porte sur l'étude de tous les étangs de la Dombes, pris comme un ensemble interconnecté. En raison du fait que les apports d'eau dans les étangs sont assurés que par les précipitations, des connexions entre les étangs ont été mises en place, pour pouvoir utiliser l'eau vidangée d'un étang dans les étangs avoisinants. Ces échanges d'eau peuvent modifier la dynamique de l'eau modélisée pour chaque étang individuellement. Pour cette raison, dans la dernière partie de ce chapitre, nous nous intéressons à l'effet que la dynamique d'un ensemble d'étangs peut avoir sur les caractéristiques individuelles d'un étang.

Un résumé de tous les résultats se trouve à la fin du chapitre.

3.1 Définition d'un étang

Avant de modéliser la dynamique d'un étang, il faut d'abord préciser ce qu'un étang représente exactement. Dans cette étude, un étang est une unité caractérisée par une série de propriétés, que nous définissons ci-dessous. Étant donné qu'une partie de ces propriétés varie dans le temps, il faut connaître les valeurs de toutes les propriétés à un instant donné, pour complètement caractériser un étang à cet instant. Nous distinguons trois types de propriétés : physiques, d'exploitation et géographiques.

Propriétés physiques

Les propriétés physiques sont définies dans le Tableau 3.1 et une représentation graphique de ces propriétés se trouve sur la Figure 3.1.

TABLE 3.1 – Définitions des propriétés physiques d'un étang.

Propriétés physiques	Définition	Variation temporelle	Unité mesure	Données ¹
niveau d'eau absolu	Hauteur de remplissage en eau de l'étang, mesurée à partir du fond de l'étang. Est toujours inférieur ou égal à la profondeur.	Oui	m	Non
profondeur	Niveau d'eau absolu quand l'étang est complètement rempli. Peut être appelé aussi niveau d'eau maximal.	Non	m	Non
niveau d'eau relatif	Niveau d'eau absolu divisé par la profondeur de l'étang. Peut prendre des valeurs entre 0 et 1.	Oui	-	[ONCFS] ²
surface d'eau maximale	La surface de l'eau quand l'étang est complètement rempli. Peut être appelée aussi surface de l'étang.	Non	ha ou m ²	[ONCFS] ³
surface d'eau	La surface de l'eau correspondante à une quantité d'eau qui remplit l'étang jusqu'au niveau d'eau absolu.	Oui	ha ou m ²	Non

¹ données dont on dispose pour cette étude

² données de niveaux d'eau relatifs moyens pour un étang moyen dans des conditions météorologiques moyennes

³ données de représentation géographique des étangs. Les surfaces indiquées sur la couche géographique sont considérées comme des surfaces maximales.

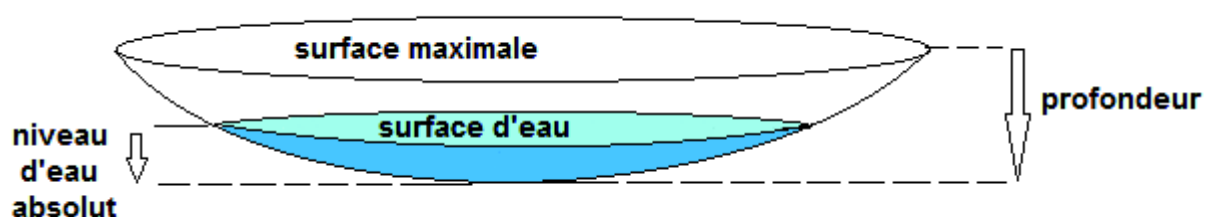


FIGURE 3.1 – Schéma simplifié de la forme d'un étang.

Propriétés d'exploitation

Les propriétés d'exploitation sont liées à la gestion humaine de l'étang. Ces propriétés sont définies dans le Tableau 3.2.

TABLE 3.2 – Définitions des propriétés d'exploitation d'un étang.

Propriétés d'exploitation	Définition	Variation temporelle	Unité mesure	Données ¹
état	A tout moment, un étang peut être dans un seul des trois états suivants : eau, pêche ou assec.	Oui	-	[ONCFS] ²
date de début de l'état	Le mois auquel l'état actuel de l'étang a débuté.	Oui	date (mois)	[ONCFS] ²
durée de l'état	Nombre de mois que l'étang reste dans un état donné.	Oui	mois	[ONCFS] ²

¹ données dont on dispose pour cette étude

² données des états de 91 étangs, chaque mois, pendant 25 ans

Propriétés géographiques

Les propriétés géographiques sont liées à la localisation spatiale d'un étang. Nous disposons d'une couche géographique vectorielle (shapefile), de l'ONCFS, qui permet de représenter tous les étangs sur une carte, sous forme de polygones, chacun ayant une localisation spatiale précise (voir Figure 3.2). Cette couche géographique permet d'extraire les propriétés géographiques définies dans le Tableau 3.3.

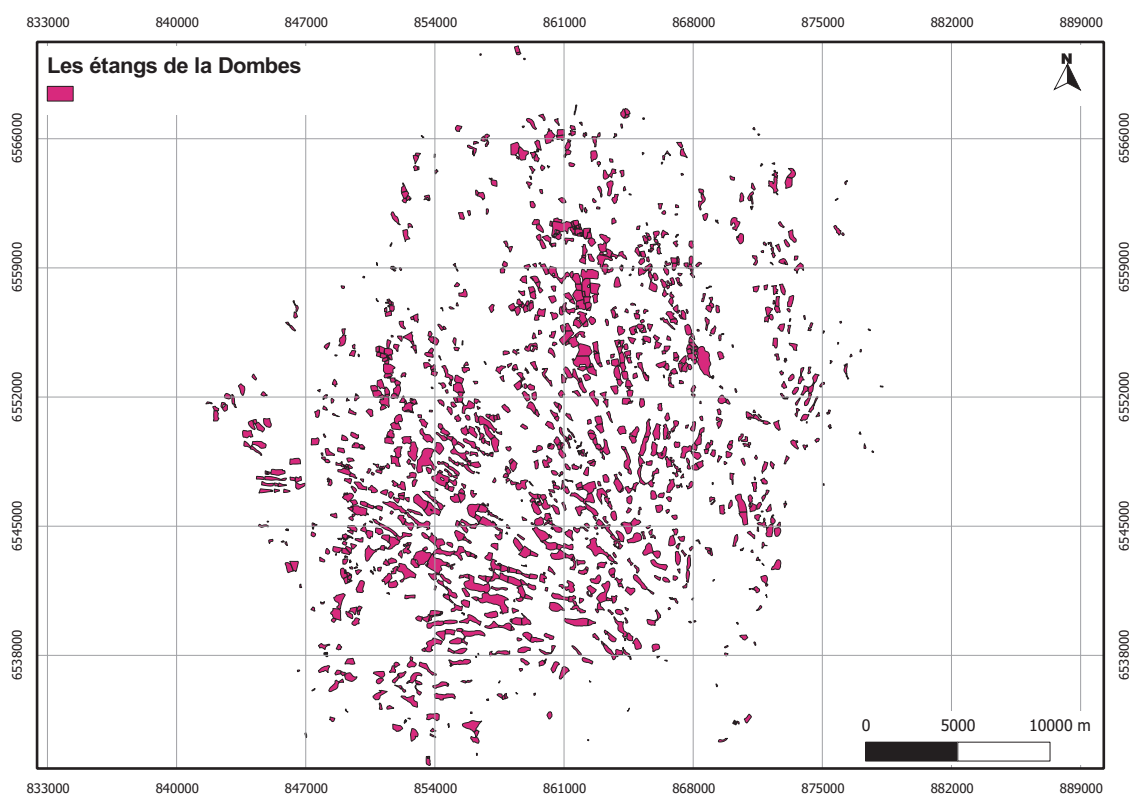


FIGURE 3.2 – Carte des étangs (polygones violets) de la Dombes. Les coordonnées x et y de la carte sont indiquées sur les bords de l'image (les coordonnées sont données dans une projection Lambert93).

TABLE 3.3 – Définitions des propriétés géographiques d'un étang.

Propriétés géographiques	Définition	Variation temporelle	Unité mesure	Données
centroïde	Centre géométrique du polygone représentatif de l'étang. Sert à faire correspondre un point à un étang.	Non	-	extraites ³
coordonnées	Coordonnées cartésiennes x et y du centroïde de l'étang, dans une des projections cartographiques ¹	Non	-	extraites ³
altitude	Altitude à laquelle se trouve le centroïde de l'étang ²	Non	m	extraites ³

¹ la projection utilisée dans cette étude est Lambert93

² les centroïdes des étangs sont superposés à la carte des altitudes de la France, et l'altitude correspondante aux coordonnées du centroïde est choisie comme l'altitude de l'étang

³ les données sont extraites à partir des données brutes de couche géographique des étangs de la Dombes (source des données ONCFS)

Il existe des interactions entre les propriétés physiques et d'exploitation, qui font que les valeurs des unes peuvent modifier les valeurs des autres. Ces interactions, ainsi que les modèles utilisés pour estimer les propriétés pour lesquelles nous n'avons pas de données, sont détaillés par la suite.

3.2 Dynamique des états d'un étang

Cette partie concerne les propriétés d'exploitations d'un étang : son état, la date de début de l'état et la durée de l'état. Nous proposons ici une modélisation de la dynamique des états d'un étang.

3.2.1 Les états d'exploitation

Un étang de la Dombes peut être dans un de trois états d'exploitation : eau, pêche ou assec. Un étang ne peut se retrouver que dans un seul état à la fois.

Eau

Lorsqu'un étang a un niveau d'eau assez important et il est soit empoissonné, soit laissé "à la nature", il est considéré comme étant en eau. L'état eau peut durer plusieurs mois à plusieurs années. C'est l'état pendant lequel les organismes (plantes, algues, poissons, oiseaux) se développent et abondent. Les différentes matières qui se déposent sur le fond de l'étang enrichissent le seuil pauvre de la région et le rendent adapté à l'agriculture, lors des passages en assec. La quantité d'eau d'un étang en eau est soumise aux effets à la météorologie (vents, précipitations, évaporation, ...), sachant que les seuls apports d'eau dans les étangs de la Dombes sont d'origine météorique (précipitations); en moyenne la quantité de pluie doit représenter 5 fois la superficie de l'étang pour qu'il soit rempli [Avocat, 1975]. Pour utiliser au mieux l'eau dans la Dombes, ils existent cependant des connexions entre la plupart des étangs, qui permettent aux étangs en aval de profiter de l'eau de vidange des étangs en amont. Pour effectuer les opérations de remplissage et de vidange, les gérants des étangs doivent se synchroniser, tâche qui n'est pas toujours facile.

Pêche

Lorsque la période de pêche arrive, l'eau de l'étang est vidée peu à peu, de façon à forcer les poissons à se réfugier au fond de l'étang dans la petite hauteur d'eau qui reste. La pêche a lieu généralement en automne et dure au maximum 4 mois. Après la pêche l'étang est soit remis en état eau, soit il passe en assec.

Assec

Un étang en assec est complètement asséché (vidage rapide de toute son eau, grâce à un système de vidage appelé "thou"). L'état assec est important pour la survie de l'étang, car il permet la réalisation des travaux d'entretien et le sol du fond de l'étang est assez riche pendant cette période pour pouvoir cultiver des céréales (avoine, maïs ou blé). L'étang est mis en assec surtout en été, quand l'évaporation est maximale. La durée de cet état varie en fonction des pratiques de l'exploitant (e.g. type de culture).

3.2.2 Modèles

L'objectif est de connaître l'état d'un étang à tout moment et donc de pouvoir observer son évolution au cours du temps. Les notations suivantes sont utilisées : E = état eau, P = état pêche et A = état assec. Une transition a lieu lorsqu'un étang passe d'un état vers un autre. Les transitions peuvent être comparées à un processus non-Markovien, car la décision de passer d'un état v vers un état u dépend du t_0 auquel l'état v a débuté. L'évolution des états d'un étang dans le temps peut donc être regardée à deux échelles de temps différentes : d'une transition vers une autre ($1, 2, 3, \dots, n, n+1, \dots$) et le temps entre deux transitions. Si t_0 indique toujours le temps quand une transition a eu lieu, alors le temps entre deux transitions est $t_0, t_0 + t, t_0 + t + 1, \dots$. Ces conventions sont illustrées sur la Figure 3.3.

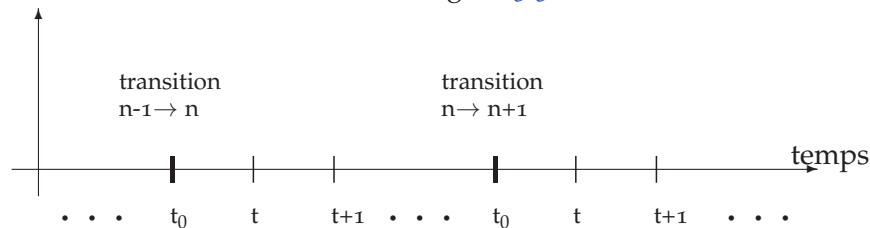


FIGURE 3.3 – Diagramme convention pas de temps entre transitions d'un état vers un autre. Lors d'un changement d'état, le compteur du temps se réinitialise à t_0 .

Soit $E(t | t_0)$, $P(t | t_0)$ et $A(t | t_0)$ les probabilités qu'au temps t l'étang se trouve dans l'état E, P ou A, respectivement, sachant l'état au temps t_0 . $E(t | t_0)$, $P(t | t_0)$ et $A(t | t_0)$ varient entre 0 et 1 et $E(t | t_0) + P(t | t_0) + A(t | t_0) = 1$. A $t = t_0$ a lieu une transition vers un état X et $X(t_0) = 1$, où X est un des trois états E, P ou A (la probabilité pour les deux autres états est nulle, car un étang ne peut se retrouver que dans un seul état à la fois). L'équation 3.1 décrit la dynamique des états entre deux transitions. La décision de changer d'état dépend de t_0 , du temps passé dans cet état et des probabilités de passage d'un état à un autre. Si la transition a lieu, alors le compteur du temps est remis à t_0 et l'Eq. 3.1 se réapplique, sinon l'état ne change pas.

$$\begin{pmatrix} E(t+1|t_0) \\ P(t+1|t_0) \\ A(t+1|t_0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w(E \leftarrow E|t_0) & w(E \leftarrow P|t_0) & w(E \leftarrow A|t_0) \\ w(P \leftarrow E|t_0) & w(P \leftarrow P|t_0) & w(P \leftarrow A|t_0) \\ w(A \leftarrow E|t_0) & w(A \leftarrow P|t_0) & w(A \leftarrow A|t_0) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E(t|t_0) \\ P(t|t_0) \\ A(t|t_0) \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

,avec $w(u \leftarrow v|t_0)$ la probabilité de passer de l'état v vers l'état u , sachant que l'état v avait débuté au temps t_0 ($u, v = E, P$, ou A).

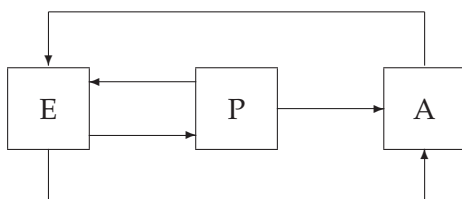


FIGURE 3.4 – Transitions possibles entre les états des étangs. E pour eau, P pour pêche et A pour assec.

Toutes les transitions sont possibles, sauf le passage d'assec vers pêche (voir figure 3.4). Dans le cadre d'un stage de Master, [Asse, 2010] a exploité des données sur 91 étangs et leurs états chaque mois pendant une période de 25 ans [ONCFS]. A partir de ces données, [Asse, 2010] créent des tableaux de fréquence (cf. Tableaux A.1- A.5) des durées de séjour d'un étang dans un état en fonction du mois. En utilisant ces tableaux comme lois de probabilités discrètes, il est possible de tirer la durée de séjour dans un état à partir du temps t_0 , mais aussi le nouvel état dans lequel l'étang se trouvera au temps $t_0 + \text{durée}$. Les probabilités $w(u \leftarrow v|t_0)$ sont également calculées comme par la suite.

– pour les passages venant de E :

$$\begin{cases} w(P \leftarrow E|t_0) = a(t_0)H[t_0 + t_{PE}(t_0) - t] \\ w(A \leftarrow E|t_0) = (1 - a(t_0))H[t_0 + t_{AE}(t_0) - t] \\ w(E \leftarrow E|t_0) = 1 - w(P \leftarrow E|t_0) - w(A \leftarrow E|t_0) \end{cases} \quad (3.2)$$

Où :

$$a = \frac{\text{Nombre de passages de E vers P sachant que j'ai commencé E à } t_0}{\text{Nombre de passages de E vers P} + \text{Nombre de passages de E vers A}}$$

et $t_{PE}(t_0)$, $t_{AE}(t_0)$ les durées de séjours respectifs de E vers P et de E vers A et $H(x)$ la fonction de Heaviside,

$$H(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x > 0 \\ 0 & \text{si } x \leq 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

– pour les passages venant de P :

$$\begin{cases} w(E \leftarrow P|t_0) = b(t_0)H[t_0 + t_{EP}(t_0) - t] \\ w(A \leftarrow P|t_0) = (1 - b(t_0))H[t_0 + t_{AP}(t_0) - t] \\ w(P \leftarrow P|t_0) = 1 - w(E \leftarrow P|t_0) - w(A \leftarrow P|t_0) \end{cases} \quad (3.4)$$

Où :

$$b = \frac{\text{Nombre de passages de P vers E sachant que j'ai commencé P à } t_0}{\text{Nombre de passages de P vers E} + \text{Nombre de passages de P vers A}}$$

et $t_{EP}(t_0)$, $t_{AP}(t_0)$ les durées de séjours respectifs de P vers E et de P vers A.

– pour les passages venant de A :

$$\begin{cases} w(P \leftarrow A|t_0) = 0 \\ w(E \leftarrow A|t_0) = H[t_0 + t_{EA}(t_0) - t] \\ w(A \leftarrow A|t_0) = 1 - w(E \leftarrow A) \end{cases} \quad (3.5)$$

Avec $t_{EA}(t_0)$, les durées de séjours respectifs de A vers E. Les t_{ij} et les t_{ji} sont différents et sont des variables aléatoires de distributions empiriques.

A partir de ce modèle, 600 simulations sont réalisées, chacune décrivant l'évolution des états d'un étang sur 5 ans. Les conditions initiales sont fixés au hasard que l'étang se trouve en état eau (E) au mois de janvier. Les logiciels utilisés sont R 3.0.2 et Matlab 7.0.

3.2.3 Résultats et illustrations

Pour chaque simulation réalisée, les états dans lesquels se trouve l'étang et les durées de séjour dans ces états sont calculées. La Figure 3.5 montre les distributions des durées des états E, P et A. L'état P ne peut pas durer plus de 4 mois, avec un durée de 1 et 2 mois majoritairement et très rarement de 4 mois. L'état E peut durer jusqu'à 36 mois, avec une durée moyenne de 10 mois et de durées supérieures à 17 mois très rares. L'état assec (A) peut durer jusqu'à 39 mois, avec une durée moyenne de 9 mois et de durées supérieures à 14 mois assez rares. La tradition dans la Dombes était d'alterner 2 ans d'évolage avec 1 an d'assec. A partir de ces résultats, une hausse des durées de l'évolage et de l'assec est remarquée.

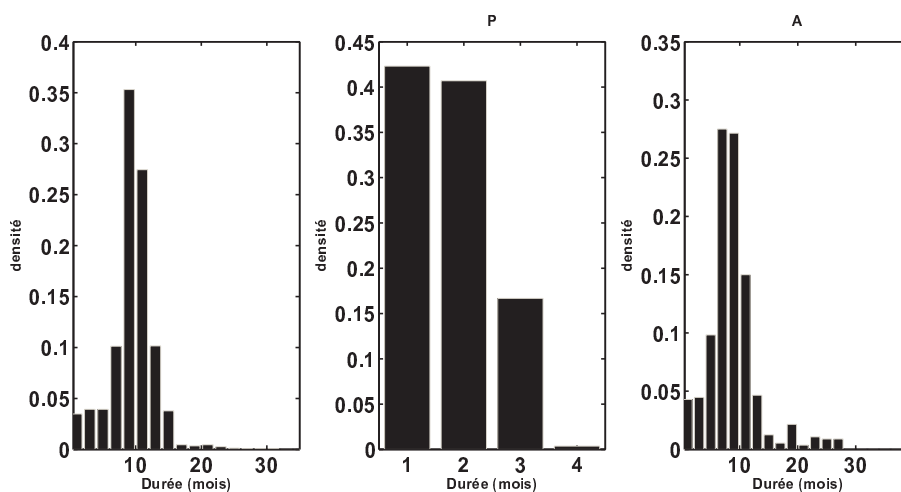


FIGURE 3.5 – Histogrammes des durées de séjour d'un étang dans chacun des 3 états possible (E, P ou A).

Quand est-il plus probable qu'une transition ait lieu ? Le passage d'un état vers un autre dépend de l'état précédent et du temps de séjour dans l'état précédent. Il est donc intéressant de calculer les probabilités de transiter vers l'état E (ou P, ou A) pour chaque mois et en fonction de l'état précédent. Les probabilités de transition vers l'état E sont présentées sur la Figure 3.6, un étang étant plus susceptible de passer en eau en hiver, fin d'automne ou début printemps. La Figure 3.7 indique que le passage vers l'assec se fait surtout au printemps. La Figure 3.8 montre que la pêche a lieu surtout en automne.

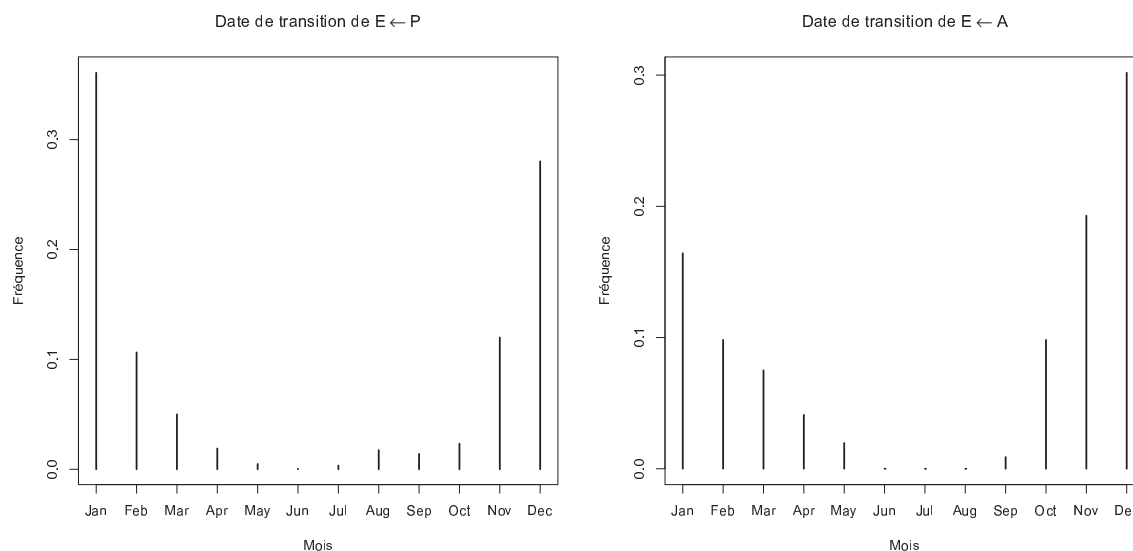


FIGURE 3.6 – Distribution des dates de transition vers l'état E, à partir soit de l'état P (figure de gauche), soit de l'état A (figure de droite).

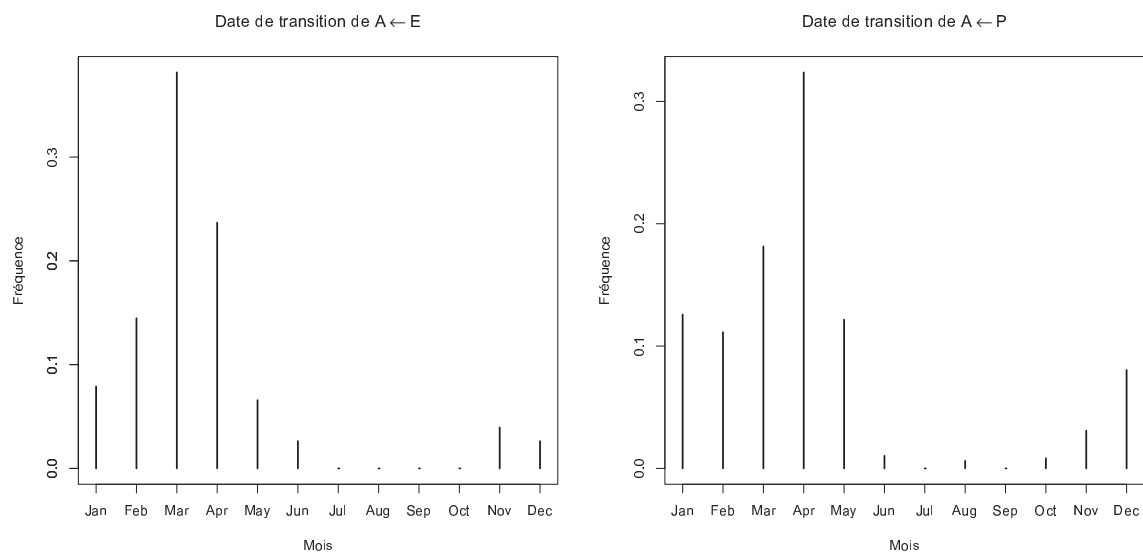
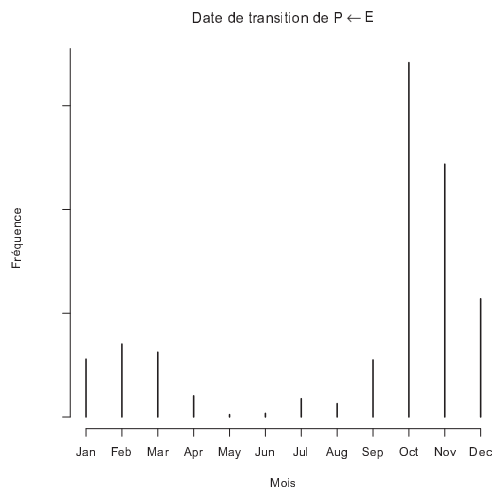


FIGURE 3.7 – Distribution des dates de transition vers l'état A, à partir soit de l'état E (figure de gauche), soit de l'état P (figure de droite).



ERROR: undefinedfilename
OFFENDING COMMAND: findfont

STACK:

/

/DPYZUV+