



Master 2 Mention : Évolution, Patrimoine et Sociétés

Spécialité : Systématique, Évolution et Paléontologie

Parcours : Expertise Faune-Flore, Inventaires

et Indicateurs de Biodiversité

UPMC
PARIS UNIVERSITÉS



Mise en place d'un suivi temporel standardisé du sonneur à ventre jaune, *Bombina variegata*, en Alsace



Julie LAMBREY

Stage du 01/03/2013 au 31/08/2013 à :
Association BUFO,
Musée d'Histoire naturelle et d'Ethnographie
11 rue de Turenne,
68000 Colmar

BUFO

Année universitaire 2012-2013
Soutenance le 24/08/2013 (date temporaire)

Maître de stage:
M. Jean-Pierre Vacher
Chargé d'études à BUFO

Tuteur pédagogique :
M. Hugo Cayuela
Doctorant à l'Université Lyon 1
CNRS, UMR 5023 - LEHNA

Page de garde :

Figure 1 – Photographie d'un sonneur à ventre jaune, *Bombina variegata*. ©Julie Lambrey

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer mes plus vifs remerciements à M. Jean-Pierre Vacher, mon maître de stage à BUFO, pour tout ce qu'il a pu m'apprendre, pour le plaisir de travailler avec lui, ainsi que pour sa réelle disponibilité.

Toujours à BUFO, un grand merci à Mlle Anne Ganet, Mlle Fanny Gosselin, Mlle Adeline Haller et Mlle Victoria Michel pour leur aide au cours de l'échantillonnage sur le terrain. Je remercie également Mlle Aline Blandin et Mlle Priscilla Illy, mes colocataires et collègues stagiaires à BUFO, pour leur compagnie et leur joie de vivre. Merci aussi à tous les salariés et les stagiaires des autres associations du 8 rue Adèle Riton, à savoir, GEPMA, FNE, ODONAT, la LPO Alsace et Alsace Nature, pour leur accueil chaleureux.

Je tiens à remercier tout particulièrement M. Hugo Cayuela, doctorant à l'Université Lyon 1 (CNRS, LEHNA), pour toute l'aide qu'il m'a apportée au cours des analyses statistiques, pour l'élaboration des modèles de détection et pour sa disponibilité.

Par ailleurs, je souhaite remercier les organismes et les personnes avec lesquels j'ai été en contact au cours de ce stage, pour leur aide sur le terrain et pour leur disponibilité:

- Le Conservatoire des sites alsaciens : Mme Gaëlle Grandet, chargée de mission scientifique ; Mme Catherine Pelon, technicienne de terrain, pour la visite du site CSA à Fort-Louis.
- L'ONF : M. Julien Prinnet, chargé de mission zones humides, pour m'avoir aidé à obtenir les autorisations de circuler sur les chemins forestiers ; M. François Schilling et M. Gaël Fellet, agents patrimoniaux, pour leur aide sur le terrain.
- La RNN de la Petite Camargue Alsacienne : Mme Léa Merckling, conservatrice de la réserve, pour la visite des sites de suivi situés dans la réserve.
- La RNN de Rhinau : M. Richard Peter, garde animateur de la réserve, pour la visite des sites de suivi situés dans la réserve.
- La maison du Sundgau : pour l'accueil et pour mon hébergement dans le Sundgau.

Ensuite, je tiens à remercier les responsables du Master E2F, à savoir, M. Bruno de Reviere, Mme Isabelle Leviol, M. Francis Olivereau et Mme Dominique Richard, pour m'avoir permis d'intégrer cette formation, au cours de laquelle j'ai beaucoup appris.

Enfin, je remercie ma famille : Florie et Lucas, mes parents et mes grands-parents, pour le soutien et l'amour qu'ils m'apportent au quotidien.

Présentation de la structure d'accueil : BUFO

BUFO est une association à but non lucratif (loi 1908), créée en 1997, qui est vouée à promouvoir la connaissance et la préservation des amphibiens et des reptiles d'Alsace. Le siège social de l'association se trouve au Musée d'Histoire naturelle et d'Ethnographie de Colmar (68), et le siège administratif est situé dans la maison des associations naturalistes à Strasbourg (67). L'association s'articule autour d'un conseil d'administration (13 membres), de deux salariés (Victoria MICHEL, chargée de missions et Jean-Pierre VACHER, chargé d'études), de bénévoles et d'adhérents.

BUFO déploie son action selon quatre axes : 1) Améliorer les connaissances sur le statut et la répartition des espèces dans la région, par le biais d'études, d'inventaires et d'expertises ; 2) Valoriser et diffuser les connaissances sur l'herpétofaune alsacienne pour informer, sensibiliser et apporter des outils qui soient adaptés pour permettre la conservation des espèces ; 3) Assurer un rôle de conseil et d'expertise auprès de toute personne ou organisme demandeur d'informations herpétologiques ; 4) Coordonner, initier ou effectuer tout travail destiné à la conservation et à la protection des espèces et de leurs habitats.

Pour mener à bien ces quatre missions, BUFO collabore avec les services de l'Etat, les administrations, les collectivités territoriales, les associations naturalistes et les particuliers d'Alsace et de Lorraine. BUFO s'entoure aussi de collaborateurs scientifiques en France et de partenaires institutionnels de protection de l'herpétofaune au niveau communautaire. L'objectif principal de l'association BUFO est bien de mettre en place des actions concrètes en impliquant le maximum d'acteurs, et ce, à différentes échelles, dans une optique de conservation de l'herpétofaune alsacienne.

Table des matières

Introduction	1
1 Matériel et méthodes	3
1.1 Espèce étudiée	3
1.2 Aire d'étude	3
1.3 Protocole de suivi par « <i>site occupancy</i> »	5
1.3.1 Principe de la méthode de suivi par « <i>site occupancy</i> »	5
1.3.2 Élaboration du plan d'échantillonnage	6
1.4 Analyses statistiques et modélisation	9
1.4.1 Analyses préliminaires	9
1.4.2 Élaboration des modèles de détection et d'occupation	9
2 Résultats	11
2.1 Analyses préliminaires	11
2.1.1 Analyses en composantes principales	11
2.1.2 Matrice de corrélation	13
2.2 Modélisation	15
2.2.1 Probabilités de détection	15
2.2.2 Probabilités d'occupation	15
3 Discussion	17
3.1 Détection et occurrence du sonneur en Alsace	17
3.1.1 Probabilités de détection	17
3.1.2 Probabilités d'occupation	18
3.2 Comparaison avec d'autres études	20
3.2.1 Probabilités de détection	20
3.2.2 Probabilité d'occupation	21
3.3 Remarques et limites du protocole	23
3.4 Implications pour la conservation	24
Conclusion	26
Bibliographie	28

Introduction

L'écologie (ou biologie) de la conservation pourrait être définie comme l'étude des mécanismes écologiques, économiques et sociologiques, qui affectent la dynamique actuelle de la biodiversité, et qui est appliquée à sa préservation. (Couvet et Teyssède-Couvet, 2010). Le constat de la crise actuelle d'extinction de la biodiversité à l'échelle mondiale a accru le besoin de mener des programmes de suivi de population à large échelle pour analyser la répartition des espèces en déclin, afin de quantifier et comprendre les raisons de leur régression (Bailey *et al.*, 2004). Historiquement, les biologistes de la conservation s'attachaient à étudier des espèces « emblématiques » dont l'écologie était bien connue et dont la méthode de suivi était facile à mettre en œuvre (forte détectabilité, capture ou marquage très simple). Il s'agissait majoritairement d'oiseaux ou de grands mammifères, pour lesquels des comptages permettaient une bonne estimation des effectifs. Aujourd'hui, la répartition de nombreuses espèces en déclin est étudiée, grâce à la mise en place de différentes méthodes de suivi adaptées en fonction des caractéristiques biologiques et de la dynamique des populations de l'espèce considérée (Besnard & Salles, 2010).

L'herpétofaune est particulièrement concernée car, depuis les années quatre-vingt-dix, de nombreuses études témoignent d'un déclin des amphibiens à un niveau global (Collins & Storfer, 2003 ; Hayes *et al.*, 2010 ; Wake, 1991 ; Wake & Vredenburg, 2008). Les amphibiens seraient d'ailleurs le groupe taxinomique le plus impacté par la crise d'extinction de la biodiversité, puisqu'un tiers des espèces évaluées par l'IUCN¹ seraient actuellement menacées d'extinction et que 43% seraient en déclin (<http://www.iucnredlist.org/initiatives/amphibians/analysis>, consulté le 13/08/13). Depuis une décennie, de nombreux suivis ont été mis en place pour évaluer le statut des amphibiens. La plupart des suivis actuels sont menés à des échelles locales avec des méthodes d'échantillonnage qui sont adaptées au suivi d'espèces communes.

¹ IUCN: *International Union for Conservation of Nature*

² « *site occupancy* » : Méthode de suivi de population par présence/absence.

En France, on peut citer le programme POPAMPHIBIEN, mis en place par la Société herpétologique de France en collaboration avec le Muséum national d'Histoire naturelle, qui vise à estimer les évolutions de l'état de la batrachofaune française à partir de l'estimation de l'abondance de certaines espèces dans les sites aquatiques (<http://lashf.fr/Dossiers/2012/f%C3%A9vrier/Protocole%20POPAMPHIBIEN%20ABONDANCE%20ESPECES%20CIBLES.pdf>, consulté le 23/08/2013). Des méthodes récentes dites de « site occupancy »² (présence/absence), permettent de mettre en place des suivis à large échelle, à long terme, et adaptés pour des espèces rares ou à la biologie complexe, grâce à l'évaluation de la détectabilité et de l'occurrence des espèces. L'évolution de l'occurrence au cours du temps est en effet un bon indicateur de la tendance des populations (Weir *et al.*, 2005).

Le sonneur à ventre jaune, *Bombina variegata*, est une espèce rare dont le statut est défavorable en France, et qui n'est pas pris en compte dans le protocole POPAMPHIBIEN. Classé vulnérable sur la liste rouge nationale, il est aussi listé aux Annexes II et IV de la Directive européenne « Habitats-Faune-Flore », c'est pourquoi il fait l'objet d'un Plan national d'action (PNA) en France, pour sa conservation (Duguet & Melki, 2003; ECOTER, 2011 ; Gasc *et al.*, 1997 ; Thiriet & Vacher, 2010). Dans le cadre de la fiche action n°3 du Plan régional d'actions (PRA) Alsace en faveur de *Bombina variegata*, notre étude a pour objectif la mise en place d'un suivi du sonneur à ventre jaune à large échelle, car il n'existe pas de suivi standardisé des populations de sonneur à ventre jaune en Alsace. (Vacher, 2012).

Par ailleurs, le sonneur à ventre jaune est une espèce longévive et qui possède une écologie particulière en période de reproduction. En effet, les femelles pondent de manière fractionnée au cours de la saison, et les mâles ont un chant peu audible, car ils ne possèdent pas de sacs vocaux, et doivent parcourir les sites de reproduction à la recherche des femelles. Cette écologie particulière implique un protocole de suivi et un plan d'échantillonnage adaptés. Le second objectif de notre étude concerne le protocole de suivi qui doit être mené à long terme, pour pouvoir déceler une tendance des populations, et mené avec la méthode de « site occupancy » pour que le plan d'échantillonnage permette de refléter les réalités écologique et biogéographique de la répartition du sonneur à ventre jaune en Alsace.

² « site occupancy » : Méthode de suivi de population par présence/absence.

1 Matériel et méthodes

1.1 Espèce étudiée

Le sonneur à ventre jaune, *Bombina variegata* Linné, 1758, est un petit amphibien anoure de la famille des Bombinatoridae, facilement reconnaissable par la coloration aposématique³ jaune et noire de sa face ventrale, et par l'aspect cordiforme de ses pupilles (Muratet, 2008 ; ECOTER, 2011 ; Vacher, 2012). Il s'agit d'une espèce médio-européenne, qui se rencontre jusqu'à 2100m d'altitude, et qui atteint en France sa limite occidentale de répartition (Duguet & Melki, 2003). En France, le sonneur est absent de la façade Méditerranéenne et il n'est commun que dans le quart nord-est de la France (Berroneau *et al.*, 2010 ; Lescure *et al.*, 2011 ; Lescure & Massary de, 2012). En Alsace, le sonneur est surtout présent dans les forêts de plaine (**Figure 1**) (Thiriet & Vacher, 2010).

En termes de phénologie, *Bombina variegata* hiverne d'octobre à avril et sa période de reproduction s'étend du mois de mai jusqu'au mois d'août dans le nord-est de la France (Duguet & Melki, 2003). Les habitats aquatiques favorables pour cette espèce sont caractérisés par des conditions physiques instables parfois étroitement liées aux activités humaines. Il affectionne les ornières temporaires et les mares de chablis, ainsi que les fossés, les carrières et les mares dans des prairies pâturées (Barandun *et al.*, 1997 ; Gollmann & Gollmann, 2012 ; Hartel *et al.*, 2005).

1.2 Aire d'étude

Nous avons procédé à un échantillonnage du sonneur à ventre jaune sur 150 parcelles échantillon (Voir la partie 1.3.2 ci-après) qui ont été réparties dans 3 des 16 grandes régions naturelles d'Alsace. Les 3 régions considérées sont le Sundgau (le sud de l'Alsace), l'ensemble formé par les grandes forêts de plaine, et enfin, la bande rhénane (forêt qui court le long du Rhin). Ces régions seront considérées dans le protocole d'échantillonnage comme des strates.

³ Aposématique (adj.): Se dit des couleurs vives et très apparentes du corps de certains animaux qui traduisent une venimosité de l'animal et qui dissuadent ses prédateurs.

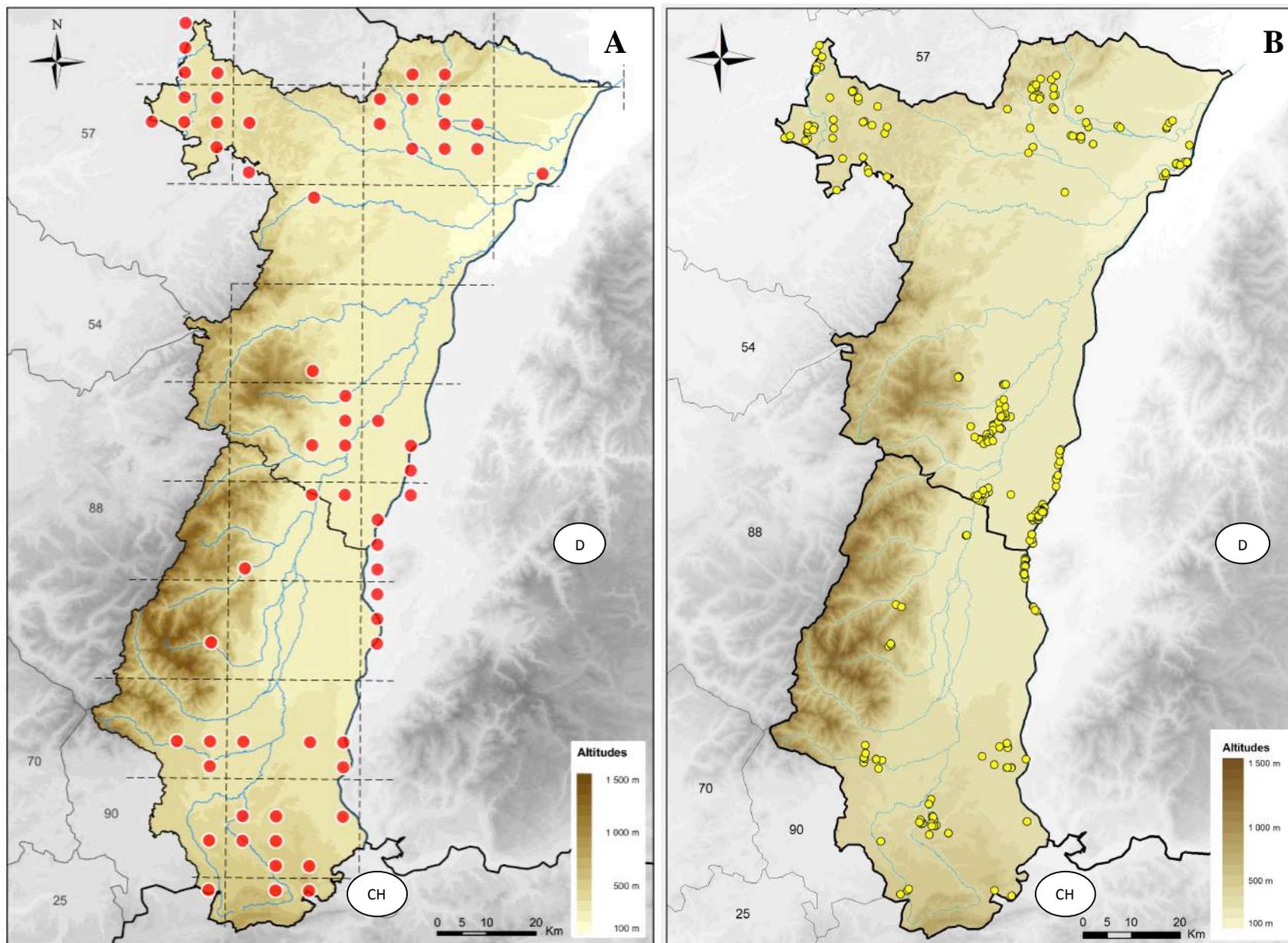


Figure 2 – Cartes de répartition de *Bombina variegata* en Alsace, A) d'après une analyse par mailles des données de 1997 à 2007, Source : (Thiriet & Vacher, 2010) ; et B) d'après une analyse des données précises de présence de l'espèce, de 1997 à 2012, Source : Fonds de carte ©IGN, données ©BUFO et ©Faune-Alsace, réalisation ©Julie Lambrey.

1.3 Protocole de suivi par « *site occupancy* »

L'objectif de l'étude est de mettre en place un suivi du sonneur à ventre jaune à large échelle et à long terme. Il va donc être impossible d'utiliser des méthodes comme le « *Distance sampling* »⁴ ou la méthode de « *capture-marquage-recapture* »⁵ (CMR) car celles-ci demanderaient des efforts d'échantillonnage considérables pour obtenir suffisamment de données. Notre choix s'est alors porté sur les méthodes dites d'« *occupancy* » (présence/absence), qui permettent de conduire des études à large échelle ou sur des espèces rares ou difficiles à détecter (Besnard & Salles, 2010).

1.3.1 Principe de la méthode de suivi par « *site occupancy* »

Les méthodes d'« *occupancy* » sont basées sur le constat que, lors d'une prospection sur un site, les espèces ne sont pas détectables avec une probabilité de 100% (MacKenzie *et al.*, 2002 ; Tyre *et al.*, 2003). Les données d'absence peuvent témoigner d'une absence réelle de l'espèce ou bien d'une non-détection, notamment pour les espèces rares ou difficiles à détecter (Besnard & Salles, 2010).

MacKenzie *et al.* (2002) ont mis au point des modèles permettant d'estimer la probabilité d'occupation d'un site par une espèce même si la détection est imparfaite. La méthode consiste à diviser l'aire d'étude en plusieurs sites. L'échantillonnage est de type présence/absence et on cherche à connaître la proportion de sites occupés par une espèce à un temps t (Kendall & White, 2009). L'échantillonnage peut être répété dans le temps (réplicats temporels) ou bien les sites peuvent être divisés en sous-unités de suivi (réplicats spatiaux) qui seront prospectées une seule fois (MacKenzie & Royle, 2005). Ces modèles permettent aussi d'analyser les relations entre l'occupation et la détection grâce à des covariables (MacKenzie & Bailey, 2004). Des extensions de ces modèles permettent aussi l'estimation de l'extinction ou de la colonisation d'un site par une espèce, ainsi que l'estimation de co-occurrence d'espèces (MacKenzie *et al.*, 2009 ; Nichols *et al.*, 2007). C'est le modèle intégrant des répliquats spatiaux que nous avons choisi pour cette étude.

⁴ « *Distance sampling* » : Méthode de suivi basée sur l'hypothèse que la probabilité de détection est fonction de la distance à l'observateur (transect ou point d'observation).

⁵ « *Capture-marquage-recapture* » : Méthode de suivi basée sur l'identification individuelle des animaux au cours de plusieurs sessions de capture.

1.3.2 Élaboration du plan d'échantillonnage

La mise en place du plan d'échantillonnage et le positionnement des sites de suivi, a nécessité un important travail de cartographie qui a été réalisé comme suit, à l'aide du logiciel ArcGIS v.9.3.

Définition de l'unité paysagère de référence

Une unité paysagère de référence est un massif forestier, ou un ensemble de massifs interconnectés, autour duquel une zone tampon de 200 mètres est délimitée. Le choix de ces entités est réalisé d'après les données précises de répartition du sonneur à ventre jaune en Alsace. Dans le cas où les données de sonneur se trouvent hors d'un massif, c'est le massif le plus proche qui est pris en compte.

Définition de la parcelle échantillon

Les parcelles échantillon sont des surfaces carrées de 300m x 300m qui sont disposées de manière aléatoire dans les unités paysagères de référence. Le nombre de parcelles échantillon par unité paysagère est proportionnel à la surface de celle-ci (**Figure 3 ci-après**). Au total, 150 parcelles sont réparties équitablement entre les 3 strates étudiées : Sundgau, grandes forêts de plaine et bande rhénane.

Définition du quadrant et des modalités d'échantillonnage

La parcelle échantillon est divisée en 9 sous-unités de 100m x 100m, appelées quadrants. Quatre quadrants sont tirés aléatoirement parmi ces 9 sous-unités (**Figure 4, p7**). L'échantillonnage est de type présence/absence au niveau de ces quadrants, et se fait par recherche de l'espèce à vue.

L'observateur passera au maximum trente minutes par quadrant. Si au bout de ce temps il n'a pas trouvé de sonneur, il passe au quadrant suivant, et dès qu'il trouve un sonneur, il passe au quadrant suivant. Plusieurs variables ont été consignées sur le terrain, à savoir, 1) la température de l'air au moment de l'échantillonnage ; 2) la date et l'heure de passage ; 3) le temps d'échantillonnage ; et 4) le nombre de pièces d'eau dans chaque quadrant.

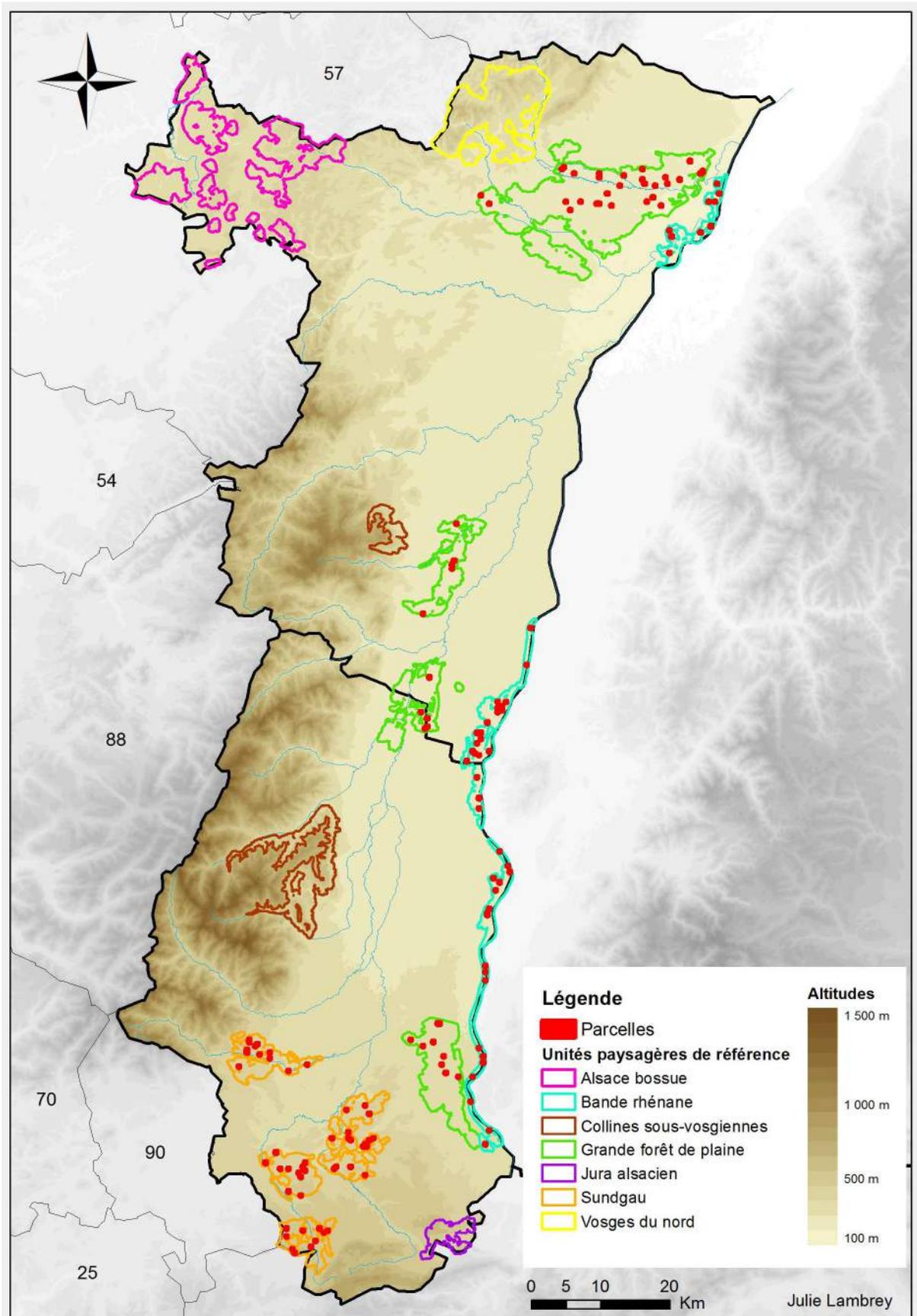


Figure 3 - Localisation des 150 parcelles échantillon (carrés rouges) et des unités paysagères de référence (liserés colorés), à l'échelle de l'Alsace. Source : fonds de carte ©IGN, réalisation ©Julie Lambrey.

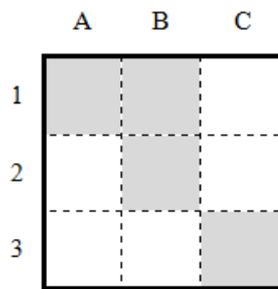


Figure 4 - Représentation schématique d'une parcelle échantillon (contour noir épais) et des quadrants (contours en pointillés) qui sont tirés aléatoirement (en gris) pour l'échantillonnage.

Nous avons réalisé une première session de terrain, de mi-avril à début juin (2013), pour repérer à l'aide de cartes et d'un GPS, les chemins d'accès et les limites des parcelles, ainsi que les habitats favorables pour le sonneur à ventre jaune. Une deuxième session de terrain, qui s'est déroulée au cours du mois de juin 2013, était dédiée à l'échantillonnage réel du sonneur à ventre jaune. Ces quadrants sont considérés comme des répliquats spatiaux au sein d'une même parcelle et les données de présence/absence sont considérées comme des histoires de détection pour chaque parcelle.

Définition des covariables occurrence

Plusieurs covariables d'occurrence ont été évaluées grâce au logiciel ArcGIS v.9.3. Ces variables ont été mesurées dans trois zones : à l'intérieur de la parcelle, dans une zone tampon de 500m autour de la parcelle et dans une zone tampon de 1500m autour de la parcelle.

Ces covariables sont 1) la densité de routes ; 2) la densité de chemins ; 3) la densité du réseau hydrographique ; 4) les pourcentages d'occupation du sol ; 5) le type de substrat géologique et 6) Le nombre de pièces d'eau dans la parcelle. Ces variables explicatives permettent de contrebalancer le biais dans les modèles qui provient du fait que les quadrants sont hétérogènes, en termes de conditions environnementales et donc en termes de probabilité de détection du sonneur à ventre jaune.

Durée et fréquence du suivi

L'objectif du suivi est d'évaluer tous les deux ou trois ans les probabilités d'occupation du sonneur à ventre jaune au niveau des quadrants. Un seul passage est prévu par année de suivi. Afin d'obtenir des résultats exploitables pour évaluer une tendance des populations, ce suivi doit être prévu pour le long terme (plus de 20 ans).

1.4 Analyses statistiques et modélisation

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R v.2.12.1. Nous avons réalisé des analyses préliminaires puis nous avons élaboré des modèles de détection, grâce aux variables de détection (mesurées sur le terrain), et des modèles d'occupation, grâce aux covariables d'occurrence (calculées avec le logiciel de cartographie).

1.4.1 Analyses préliminaires

En premier lieu, des analyses en composantes principales (ACP) ont été réalisées sur les covariables d'occurrence. Ces ACP ont été réalisées pour chaque échelle d'analyse : 1) à l'échelle de la parcelle ; 2) à l'échelle de la zone tampon de 500m autour de la parcelle et 3) à l'échelle de la zone tampon de 1500m autour de la parcelle. Cette méthode exploratoire permet d'expliquer la structuration du jeu de variables et d'observer des ressemblances entre les sites.

Nous avons ensuite réalisé une matrice des corrélations, toujours sur les variables explicatives, afin de connaître les relations entre chaque variable. Nous avons choisi le seuil de 0,4 (en valeur absolue) pour définir si deux variables sont corrélées ou non.

1.4.2 Élaboration des modèles de détection et d'occupation

Afin d'évaluer quelles variables influençant la probabilité de détection du sonneur à ventre jaune et pour évaluer le taux d'occupation du sonneur sur les sites suivis, nous avons élaboré des modèles. Nous avons dû transformer et standardiser les variables. Nous avons ainsi pu tester trois types de relations dans les modèles, à savoir, 1) une relation linéaire (variable standardisée) ; 2) une relation logarithmique (variable transformée avec le logarithme en base 10 puis standardisée) et 3) une relation quadratique (variable élevée au carré puis standardisée).

Sélection du meilleur modèle pour la probabilité de détection

Différents modèles ont été testés en faisant varier le nombre de variables et le type de relation, en fonction des histoires de détection du sonneur à ventre jaune.

Les modèles ont ensuite été hiérarchisés selon leur poids en tenant compte de l'AIC⁶. Plus l'AIC est faible, plus le modèle a du poids, et plus les effets des variables sont importants. Les différents modèles testés sont présentés dans l'**Annexe A**. Nous avons gardé le meilleur modèle de détection.

Recherche des effets significatifs sur la probabilité d'occupation

Une fois le meilleur modèle de détection choisi, on fait varier uniquement l'argument qui concerne l'occupation. On fait varier une nouvelle fois le nombre de variables et le type de relation pour observer les effets des variables sur la probabilité d'occupation du sonneur à ventre jaune. On sélectionne une nouvelle fois les meilleurs modèles. L'AIC n'est plus utilisé comme critère de sélection. On garde seulement les relations qui sont significatives. Les différents modèles testés sont présentés dans l'**Annexe B** (1 à 3).

Nous avons ensuite pu représenter graphiquement les résultats de ces analyses, pour visualiser l'effet (positif ou négatif) des conditions de terrain sur la probabilité de détection du sonneur à ventre jaune et pour visualiser l'effet des variables environnementales (qui caractérisent les sites de suivi) sur la probabilité d'occupation de l'espèce.

⁶ AIC (*Akaike Information Criterion*) : C'est un critère qui est généralement utilisé pour hiérarchiser les modèles car il exprime la qualité relative d'un modèle.

2 Résultats

2.1 Analyses préliminaires

2.1.1 Analyses en composantes principales

Les résultats des ACP, pour les trois échelles d'analyse, sont présentés dans les **Tableaux 1 à 3** et dans les **Figures 5 à 7**.

Échelle d'analyse « parcelle »

Tableau I : Pourcentages de variance expliquée par chaque composante de l'ACP (comp 1 à 7) et contribution de chaque variable à la création des quatre premiers axes (Dim 1 à 4) pour le niveau d'analyse « parcelle ».

Abréviations : ch = densité de chemins; ro = densité de routes; ce = densité de cours d'eau; ZU = % de zones urbaines; ZA = % de zones agricoles; ZP = % de zones prairiales; ZB = % de zones boisées; eau = nombre d'ornières (variable mesurée uniquement pour l'échelle d'analyse « parcelle »).

	eigenvalue	Percentage of variance cumulative	Percentage of variance	Variables	Dim 1	Dim 2	Dim 3	Dim 4
comp 1	2.07	25.85	25.85	ch	0.705	25.82	2.698	33.028
comp 2	1.37	17.12	42.97	ro	0.865	43.497	5.626	0.129
comp 3	1.10	13.74	56.72	ce	0.808	3.496	63.85	0.235
comp 4	1.07	13.34	70.06	ZU	1.182	21.01	2.198	42.12
comp 5	0.88	11.02	81.07	ZA	18.33	5.495	0.153	2.303
comp 6	0.74	9.27	90.34	ZP	27.75	0.380	0.482	0.743
comp 7	0.64	8.00	98.34	ZB	41.640	0.257	0.489	3.953
-	-	-	-	eau	8.702	0.029	24.49	17.48

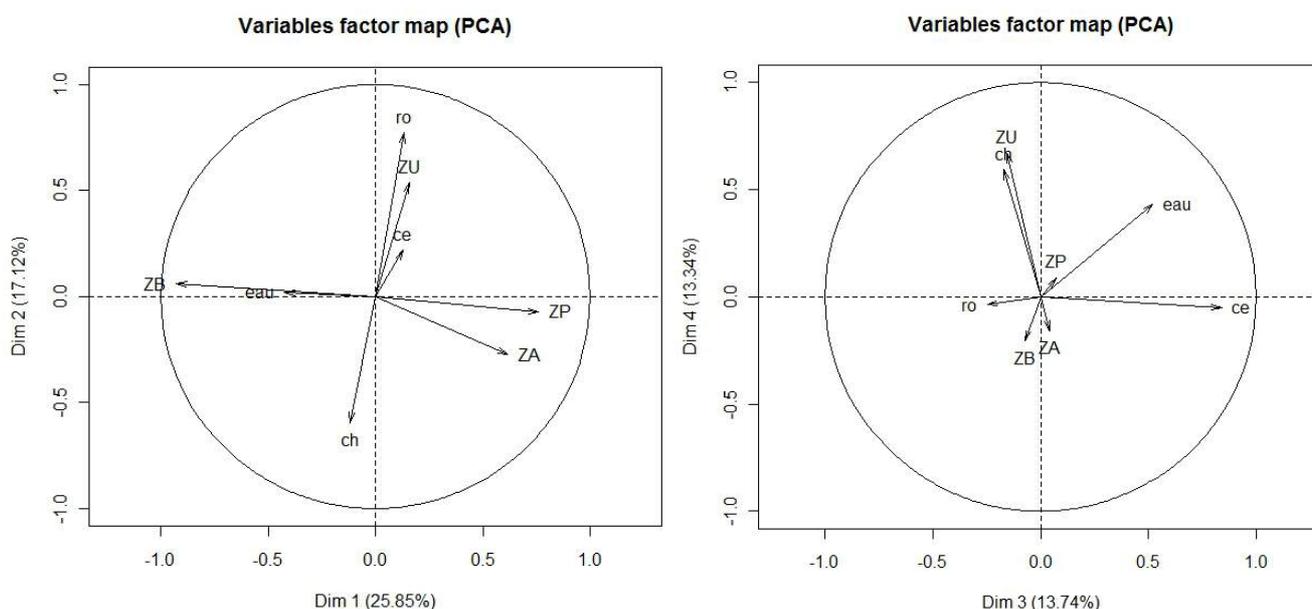


Figure 5 - Représentation graphique des contributions de chaque variable à la création des quatre premiers axes, pour l'ACP réalisée à l'échelle d'analyse "parcelle".

Échelle d'analyse « zone tampon d'un rayon de 500m autour de la parcelle »

Tableau II : Pourcentages de variance expliquée par chaque composante de l'ACP (comp 1 à 7) et contribution de chaque variable à la création des quatre premiers axes (Dim 1 à 4) pour le niveau d'analyse « zone tampon d'un rayon de 500m autour de la parcelle ».

Abréviations : ch = densité de chemins; ro = densité de routes; ce = densité de cours d'eau; ZU = % de zones urbaines; ZA = % de zones agricoles; ZP = % de zones prairiales; ZB = % de zones boisées; eau = nombre d'ornières (variable mesurée uniquement pour l'échelle d'analyse « parcelle »).

	eigenvalue	Percentage of variance cumulative	Percentage of variance	Variables	Dim 1	Dim 2	Dim 3	Dim 4
comp 1	2.36	33.68	33.68	ch500	1.586	$6.8 * 10^{-1}$	55.702	29.901
comp 2	1.34	19.13	52.81	ro500	12.551	$1.1 * 10^1$	0.792	15.559
comp 3	1.06	15.10	67.91	ce500	3.021	$2.6 * 10^1$	14.537	27.820
comp 4	0.95	13.51	81.42	ZU500	18.210	$1.7 * 10^1$	10.659	5.731
comp 5	0.68	9.77	91.18	ZA500	7.872	$4.3 * 10^1$	5.223	0.004
comp 6	0.53	7.58	98.76	ZP500	19.401	$4.7 * 10^{-4}$	12.455	19.607
comp 7	0.09	1.24	100.00	ZB500	37.355	$1.6 * 10^{-2}$	0.629	1.374

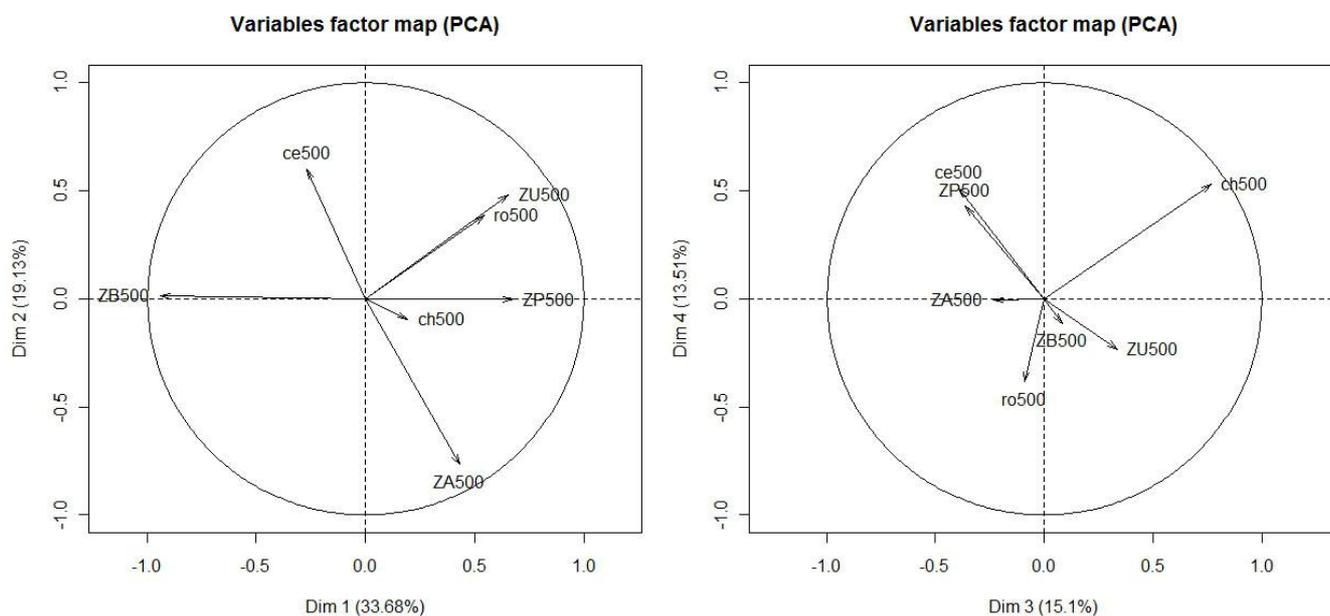


Figure 6 - Représentation graphique des contributions de chaque variable à la création des quatre premiers axes, pour l'ACP réalisée à l'échelle d'analyse "zone tampon d'un rayon de 500m autour de la parcelle".

Échelle d'analyse « zone tampon d'un rayon de 1500m autour de la parcelle »

Tableau III : Pourcentages de variance expliquée par chaque composante de l'ACP (comp 1 à 7) et contribution de chaque variable à la création des axes pour le niveau d'analyse « zone tampon d'un rayon de 1500m autour de la parcelle ».

Abréviations : ch = densité de chemins; ro = densité de routes; ce = densité de cours d'eau; ZU = % de zones urbaines; ZA = % de zones agricoles; ZP = % de zones prairiales; ZB = % de zones boisées; eau = nombre d'ornières (variable mesurée uniquement pour l'échelle d'analyse « parcelle »).

	eigenvalue	Percentage of variance cumulative	Percentage of variance	Variables	Dim 1	Dim 2	Dim 3	Dim 4
comp 1	2.99	42.68	42.68	ch1500	3.280	33.370	3.232	52.706
comp 2	1.45	20.76	63.44	ro1500	19.136	2.982	24.184	2.719
comp 3	1.17	16.65	80.09	ce1500	10.261	16.185	3.087	33.880
comp 4	0.64	9.17	89.26	ZU1500	21.142	3.527	19.077	3.428
comp 5	0.58	8.25	97.51	ZA1500	19.218	2.737	23.872	4.968
comp 6	0.14	2.04	99.55	ZP1500	1.217	38.998	13.190	2.129
comp 7	0.03	0.45	100.00	ZB1500	25.743	2.197	13.354	0.166

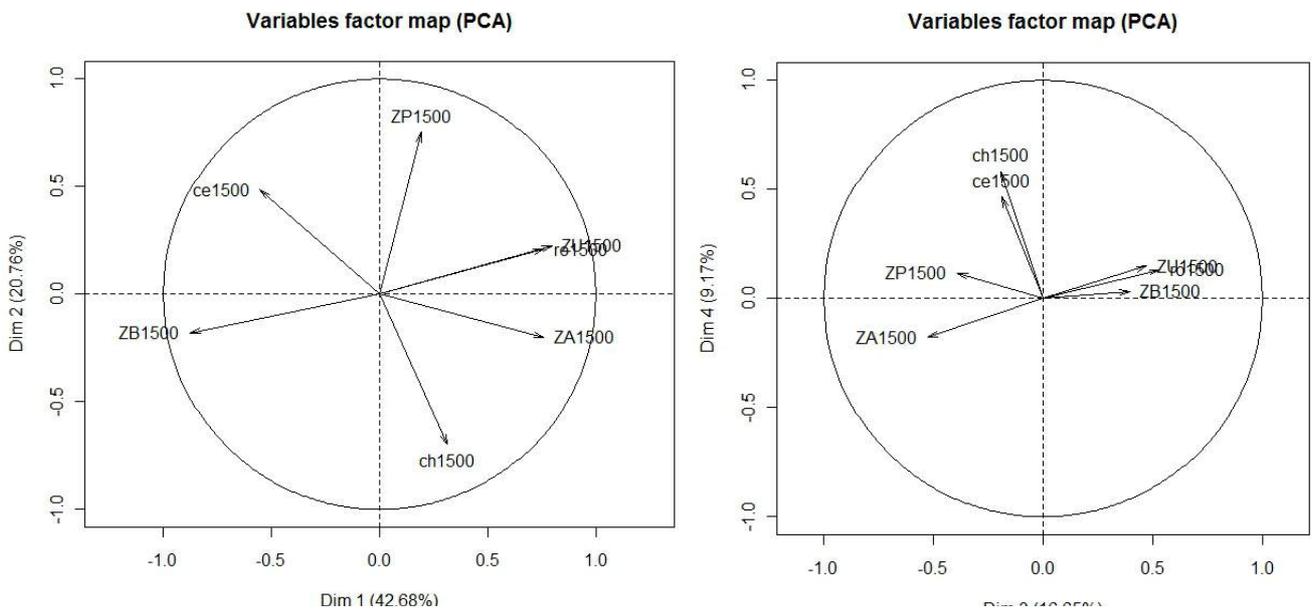


Figure 7 - Représentation graphique des contributions de chaque variable à la création des quatre premiers axes, pour l'ACP réalisée à l'échelle d'analyse "zone tampon d'un rayon de 1500m autour de la parcelle".

2.1.2. Matrice de corrélation

La matrice des corrélations des variables explicatives (**Tableau IV**) permet de déterminer quelles variables sont corrélées positivement ou négativement, d'après leur coefficient de corrélation de Pearson qui est supérieur ou égal au seuil de 0,4 en valeur absolue (chiffres en gras). Dans ce tableau, les variables sont codées selon l'échelle d'analyse considérée : avec un suffixe « 500 » pour la zone tampon de 500m autour de la parcelle et un suffixe « 1500 » pour la zone tampon de 1500m autour de la parcelle. L'absence de suffixe concerne les variables mesurées dans la parcelle.

Tableau IV : Matrice des corrélations des variables explicatives prises deux à deux.

Abréviations : ch = densité de chemins; ro = densité de routes; ce = densité de cours d'eau; ZU = % de zones urbaines; ZA = % de zones agricoles; ZP = % de zones prairiales; ZB = % de zones boisées; eau = nombre d'ornières (variable mesurée uniquement pour l'échelle d'analyse « parcelle »).

	ch	ch500	ch1500	ro	ro500	ro1500	ce	ce500	ce1500	ZU	ZU500	ZU1500	ZA	ZA500	ZA1500	ZP	ZP500	ZP1500	ZB	ZB500	ZB1500	eau
ch	-	0,55	0,28	-0,25	0,06	0,08	-0,14	0,03	-0,05	0,00	0,08	0,13	-0,01	0,07	0,20	-0,03	0,03	-0,13	0,02	-0,16	-0,18	0,07
ch500		-	0,68	-0,19	-0,03	0,19	-0,12	-0,09	-0,18	-0,04	0,12	0,25	-0,02	0,03	0,32	-0,03	0,05	-0,18	0,01	-0,14	-0,27	-0,03
ch1500			-	-0,18	0,02	0,04	-0,08	-0,26	-0,29	-0,10	0,21	0,09	0,14	0,10	0,32	0,08	-0,01	-0,22	-0,08	-0,09	-0,18	0,04
ro				-	0,29	-0,07	0,01	0,07	0,06	0,24	-0,10	-0,13	-0,05	-0,08	-0,19	0,03	-0,04	-0,02	-0,05	0,11	0,18	-0,08
ro500					-	0,45	-0,05	-0,01	-0,08	0,27	0,37	0,32	0,09	0,05	0,18	0,11	0,20	0,13	-0,17	-0,36	-0,29	-0,08
ro1500						-	-0,15	-0,23	-0,30	0,06	0,25	0,84	0,02	0,13	0,26	0,04	0,17	0,06	-0,19	-0,40	-0,50	-0,06
ce							-	0,49	0,36	0,03	-0,01	-0,20	0,04	-0,04	-0,10	0,06	0,06	0,01	-0,09	0,03	0,12	0,10
ce500								-	0,77	-0,11	-0,12	-0,36	-0,16	-0,33	-0,24	-0,07	0,00	0,00	0,10	0,13	0,21	0,27
ce1500									-	-0,09	-0,16	-0,36	-0,15	-0,30	-0,38	-0,08	-0,06	0,17	0,12	0,21	0,27	0,28
ZU										-	0,12	0,18	-0,06	0,08	0,02	-0,01	0,12	0,21	-0,20	-0,14	-0,12	0,02
ZU500											-	0,23	0,44	-0,14	0,63	0,18	0,19	0,02	-0,37	-0,61	-0,59	-0,06
ZU1500												-	0,04	0,30	0,28	0,12	0,21	0,16	-0,21	-0,42	-0,54	-0,11
ZA													-	0,35	0,42	0,11	-0,04	-0,03	-0,54	-0,41	-0,32	-0,20
ZA500														-	0,36	0,18	0,21	0,29	-0,27	-0,45	-0,37	-0,15
ZA1500															-	0,12	0,22	0,06	-0,35	-0,71	-0,87	-0,07
ZP																-	0,71	0,34	-0,69	-0,45	-0,23	-0,20
ZP500																	-	0,63	-0,49	-0,63	-0,45	-0,20
ZP1500																		-	-0,22	-0,35	-0,37	-0,07
ZB																			-	0,64	0,44	0,19
ZB500																				-	0,86	0,20
ZB1500																					-	0,12
eau																						-

2.2 Modélisation

2.2.1 Probabilités de détection

La sélection du meilleur modèle de détection par hiérarchisation des AIC nous a permis de déterminer que le nombre d'ornières dans le quadrant et la température influencent la probabilité de détection du sonneur à ventre jaune (**Figure 8**).

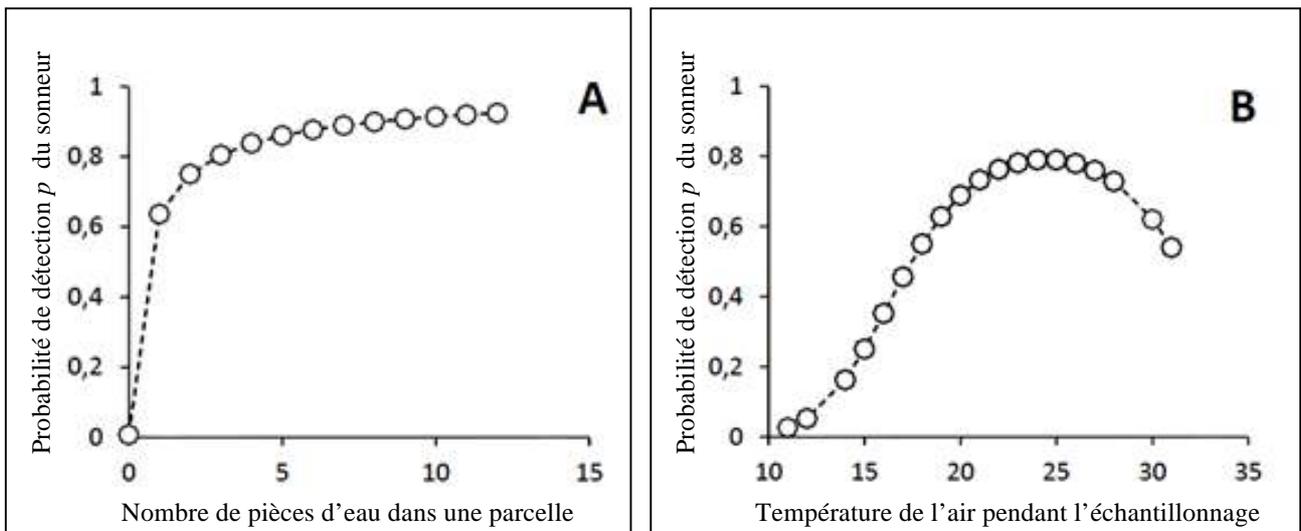


Figure 8 - Relations significatives entre les probabilités de détection p du sonneur à ventre jaune par unité d'échantillonnage et deux variables environnementales dans la plaine rhénane : A) Nombre de pièces d'eau dans l'unité d'échantillonnage (placette) ; B) Température ambiante au cours de l'échantillonnage du sonneur.

2.2.2 Probabilités d'occupation

La sélection des relations significatives des modèles d'occupation nous a permis de mettre en évidence que quatre variables influencent la probabilité d'occupation d'un site par le sonneur à ventre jaune, comme le montre la **Figure 9** ci-après.

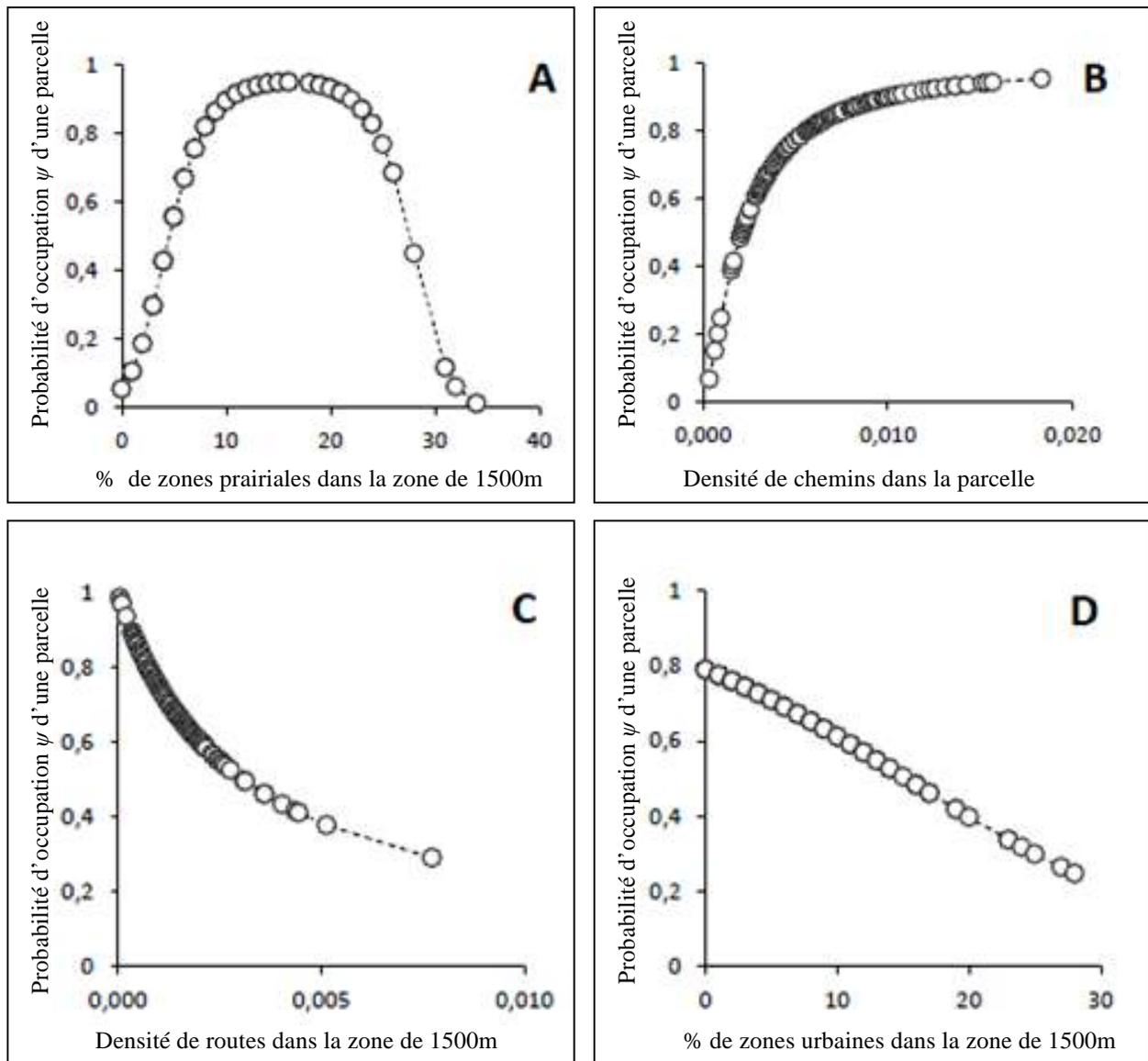


Figure 9 - Relations significatives entre les probabilités d'occupation ψ d'une parcelle par le sonneur à ventre jaune et quatre variables environnementales dans la plaine rhénane : A) Pourcentage de prairies dans une zone tampon d'un rayon de 1500m autour de la parcelle ; B) Densité de chemins au sein de la parcelle ; C) Densité de routes dans une zone tampon d'un rayon de 1500m autour de la parcelle ; D) Pourcentage de surface urbanisée dans une zone tampon d'un rayon de 1500m autour de la parcelle.

3 Discussion

3.1 Détection et occurrence du sonneur en Alsace

3.1.1 Probabilités de détection

Nos résultats montrent que la probabilité de détecter le sonneur à ventre jaune est influencée par deux facteurs, un lié aux conditions de terrain, et l'autre lié à une caractéristique physique de la parcelle échantillon qui est suivie.

Il y a tout d'abord une relation significative entre la probabilité de détection p du sonneur à ventre jaune et le nombre de pièces d'eau par unité d'échantillonnage (**Figure 8 – A**). En effet, plus le nombre de pièces d'eau augmente dans une parcelle échantillon et plus la probabilité de détecter le sonneur augmente, mais cette relation devient ensuite asymptotique, ce qui indique que malgré un très grand nombre de pièces d'eau, la probabilité de détection p reste constante. La présence de *Bombina variegata* dépend donc de la présence de nombreuses pièces d'eau au niveau des sites de suivi. C'est la raison pour laquelle les zones d'ornières créées par le passage des engins de débardage en forêt forment un biotope favorable pour cette espèce (Thiriet & Vacher, 2010). Son caractère pionnier explique aussi que ce sont les ornières récentes et temporaires qu'il choisira plutôt que les anciennes ornières en voie de colonisation par la végétation.

Il y a ensuite une relation significative entre p et la température de l'air au moment de l'échantillonnage (**Figure 8 – B**). La courbe du modèle prend une allure de relation gaussienne même si la fin du modèle n'existe pas. Ceci provient du fait que nous n'avons pas pu échantillonner des sites lorsque la température dépassait 31°C simplement car de telles températures sont rarement atteintes en sous-bois. Cette relation témoigne néanmoins d'un optimum de détectabilité de l'espèce qui se situe entre 23 et 27°C. Cet optimum est certainement lié à la phénologie du sonneur à ventre jaune, qui atteint son pic d'activité aux mois de mai et juin (Thiriet & Vacher, 2010).

3.1.2 Probabilités d'occupation

Nos résultats montrent que plusieurs variables environnementales en lien avec des éléments paysagers dans la parcelle, ou dans la zone d'un rayon de 1500m autour de celle-ci, influencent la probabilité d'occupation ψ du sonneur à ventre jaune dans cette parcelle.

Une première relation concerne le pourcentage de zones prairiales dans une zone tampon de 1500m autour de la parcelle (**Figure 9 – A**). On observe un optimum d'occupation de l'espèce quand ce pourcentage se situe entre 10 et 20%. Par ailleurs, L'ACP pour l'échelle d'analyse « parcelle » révèle un gradient d'ouverture des milieux, car les pourcentages de zones agricoles et de zones prairiales contribuent à 46% à la création des axes et sont corrélées négativement avec le pourcentage de zones boisées (41%) (**Figure 5 et Tableau I**). Le sonneur fréquente les mares en prairie, les ornières en bordure de cultures, et les ornières ensoleillées en forêt, il est donc adapté à des milieux ouverts de faible taille (Duguet & Melki, 2003). Une surface ouverte trop importante semble être défavorable pour le sonneur certainement à cause d'un effet négatif sur les températures optimales pour l'activité de l'espèce. Il ne s'agirait donc pas d'un effet spécifiquement lié à la présence de prairies mais plutôt à un effet de complémentarité des habitats dans et autour de la parcelle suivie, qui doit présenter plusieurs types de milieux pour offrir une diversité d'habitats complémentaires à la reproduction de l'espèce et lui permettre de trouver aisément des zones relativement fraîches en été et des caches protégées du gel en hiver.

Deux autres relations concernent le pourcentage de zones urbaines et la densité de routes dans une zone tampon de 1500m autour de la parcelle (**Figure 9 - C et D**). Ces variables semblent avoir un effet négatif sur la probabilité d'occupation ψ du sonneur à ventre jaune au niveau d'une parcelle. Les effets de ces variables pourraient être confondus car, bien que non corrélées (**Tableau IV**), ces variables ont une proportion importante d'information commune. Elles sont en effet corrélées de façon positive dans l'ACP à l'échelle d'analyse considérée, et corrélées de façon négative à la variable « pourcentage de zones boisées », ce qui indique un gradient de naturalité (**Figure 7 et Tableau III**). Ces résultats pourraient témoigner d'un impact du tissu urbain sur la probabilité d'occupation du

sonneur plutôt que d'un effet séparé de ces variables. La proximité d'un tissu urbain dense (bâti et voies de circulations goudronnées) semble être un élément défavorable pour *Bombina variegata*. Ce constat semble assez intuitif puisque le développement du tissu urbain est une des causes de la fragmentation des habitats et de la réduction de leur surface, et que les infrastructures linéaires constituent des obstacles à la migration des amphibiens, notamment à cause d'une mortalité directe (Thiriet & Vacher, 2010).

La troisième relation qui a pu ressortir de notre analyse est l'effet apparemment positif de la densité de chemins dans la parcelle sur la probabilité d'occupation ψ (**Figure 9 – B**). Il s'agit de chemins forestiers, alors que dans l'analyse précédente, il s'agissait de routes goudronnées. Cet effet est également intuitif car le sonneur à ventre jaune affectionne les ornières forestières creusées lors du passage des engins de débardage (Thiriet & Vacher, 2010). La présence de nombreux chemins non empierrés dans une forêt exploitée est un facteur anthropique favorable pour le sonneur. Avec un caractère pionnier prononcé, *Bombina variegata* va pouvoir se déplacer au gré des parcelles forestières exploitées, pour coloniser de nouveaux habitats de reproduction (Gaël Fellet, com. pers.).

On s'attendait à un effet positif du pourcentage de zones boisées sur la probabilité d'occupation ψ du sonneur à ventre jaune, puisque l'espèce est majoritairement présente dans les forêts de basse et moyenne altitude en Alsace (Vacher, 2012). Mais cet effet n'est pas significatif, et ce, pour les trois échelles d'analyse. L'analyse par *site occupancy* ayant été menée sur des unités paysagères de référence qui sont des massifs forestiers, on comprend que le pourcentage de zones boisées est important dans toutes les parcelles échantillon et peut-être qu'une analyse plus détaillée concernant le type de boisement (forêt de feuillus, de résineux, jeune plantation ou forêt mûre) aurait pu apporter des informations complémentaires sur l'occupation. Par ailleurs, le sonneur à ventre jaune est à l'origine une espèce de forêts alluviales et de zones de sources, et une analyse du taux de rétention de l'eau dans le sol aurait pu être intéressante en termes de pérennité des biotopes fréquentés par le sonneur. Au vu des résultats (ACP et modélisation), on peut supposer que l'effet des zones boisées est indirect et résulte d'un un équilibre entre l'ouverture des milieux et la dégradation des milieux.

On a pu également remarquer que l'échelle d'analyse « zone tampon d'un rayon de 500m autour de la parcelle » ne permettait pas de mettre en évidence des relations significatives pour la probabilité d'occupation ψ . Par ailleurs, l'ACP à l'échelle « 500m » suit la même tendance que l'ACP à l'échelle « parcelle ». Il semble qu'il n'y ait pas d'incidence de cette échelle d'analyse sur la probabilité d'occupation et qu'une échelle plus large (1500m), qui a été définie à partir du potentiel de dispersion du sonneur à ventre jaune, soit plus adaptée. Ce sont donc des éléments paysagers dans la parcelle et dans la zone potentielle de dispersion de l'espèce qui semblent influencer sur la probabilité d'occupation.

3.2 Comparaison avec d'autres études

3.2.1 Probabilités de détection

Une étude par *site occupancy* menée par Weir *et al.* (2005) sur dix espèces d'anoures nord américaines, dans le cadre d'un suivi dans le Maryland (NAAMP⁷), a révélé que la température de l'air était un facteur déterminant pour expliquer les variations que subissait la probabilité de détection pour huit des dix espèces étudiées. Le meilleur modèle de détection, pour cinq espèces (*B. americanus* ; *B. fowleri* ; *H. versicolor* ; *P. crucifer* et *R. sphenoccephala*), contenait une relation quadratique pour la variable température, comme c'est le cas dans notre étude (**Annexe A**). Les résultats montraient également un optimum d'activité de ces espèces qui était dépendant de la température au moment de l'échantillonnage, tout comme le montrent nos résultats (**Figure 8 – B**). Pour les trois autres espèces, la détection était fonction de la température, avec une relation linéaire dans le modèle (Weir *et al.*, 2005). Les résultats de cette étude semblent intuitifs si on fait mention du caractère ectotherme des amphibiens, mais pour ce qui est du sonneur, ces résultats renforcent la pertinence de notre modèle de détection en ce qui concerne la relation quadratique pour la variable température.

⁷ NAAMP : *North American Amphibian Monitoring Program*

Il semble que d'autres paramètres puissent affecter la probabilité de détection p pour une espèce donnée. Une étude menée sur une communauté de salamandres terrestres dans le Parc national des *Great Smoky Mountains* atteste que la phénologie, la densité locale, ainsi que l'effort d'échantillonnage et la méthode d'échantillonnage adoptée sont autant de facteurs qui influent sur la probabilité de détection p (Bailey *et al.*, 2004).

La phénologie de chaque espèce engendre des modèles de comportements saisonniers qui peuvent induire un biais dans l'estimation de la probabilité de détection pour une espèce donnée (Bailey *et al.*, 2004). Il est évident qu'un échantillonnage du sonneur à ventre jaune au mois de mars, et un autre au mois de mai, pendant son pic d'activité, pourraient ne pas apporter la même information sur l'occupation d'un même site puisque les probabilités de détection ne sont pas identiques.

La densité locale de l'espèce est probablement la plus grande source d'hétérogénéité entre les sites car plus la densité augmente et plus la probabilité de détecter au moins un individu augmente (Bailey *et al.*, 2004). Pour le sonneur à ventre jaune, qui a un mode de reproduction fractionné dans le temps ou l'espace⁸, la densité locale à l'échelle d'un site est difficile à évaluer (Jean-Pierre Vacher, com. pers.). Mais le fait que l'espèce possède un important potentiel de dispersion permet d'expliquer pourquoi à partir d'un certain nombre de pièces d'eau présentes dans la parcelle échantillon, la probabilité de détection reste constante (**Figure 8 – A**). Le sonneur est mobile et donc toutes les pièces d'eau favorables sur un site ont potentiellement une probabilité non nulle d'être occupées au cours de la saison de reproduction.

3.2.2 Probabilité d'occupation

L'étude menée dans le cadre du NAAMP dans le Maryland révèle qu'il y a une forte relation entre la probabilité d'occupation d'un site par une espèce et l'utilisation du paysage liée aux activités humaines (Weir *et al.*, 2005). Nous avons nous aussi trouvé des relations entre la probabilité d'occupation du sonneur à ventre jaune et plusieurs types d'utilisation du paysage.

⁸ Une femelle peut se reproduire plusieurs fois dans une même ornière au cours de la saison ou une seule fois dans des ornières différentes et les mâles sont mobiles car ils ne possèdent pas de sac vocal et doivent migrer d'une ornière à l'autre pour aller à la rencontre des femelles.

Mais, contrairement à nos résultats, il apparaît dans cette étude que la probabilité d'occupation ψ soit liée à la proportion de forêts alluviales et de marais à proximité du site de suivi, pour neuf des dix espèces étudiées et que cette probabilité ψ augmente avec la prévalence de ces habitats pour sept d'entre elles. Cette étude américaine met également en évidence le fait qu'une analyse plus poussée des types de boisement et de la couverture de la canopée, pourrait accroître la précision de la caractérisation des habitats et permettrait une meilleure interprétation de la tendance des populations (Weir *et al.*, 2005). Il apparaît que la modification des pratiques agricoles et le développement de l'urbanisation sont les principaux facteurs de la fragmentation des habitats et de l'isolement génétique des populations (Thiriet & Vacher, 2010). La mutation du paysage est rapide et il semble indispensable de suivre l'évolution des sites de suivi et les caractéristiques des habitats pour pouvoir ajuster le modèle d'occupation au cours du temps (Weir *et al.*, 2005).

De plus, dans l'étude de Bailey *et al.* (2004), il apparaît que les variations dans les probabilités de détection p ne suffisent pas expliquer les variations des probabilités d'occupation ψ . Il semble que la méthode d'échantillonnage soit un élément crucial à prendre en compte pour ajuster les modèles de détection et pour obtenir une estimation non biaisée de la probabilité d'occupation (Bailey *et al.*, 2004). Une étude par *site occupancy* menée par Pellet et Schmidt (2005) dans l'ouest de la Suisse et concernant quatre espèces d'amphibiens (*A. obstetricans* ; *B. calamita* ; *B. variegata* et *H. arborea*), témoigne que la méthode employée pour détecter le sonneur à ventre jaune ne permettait pas d'obtenir des analyses statistiques satisfaisantes. Cette étude concernait les quatre espèces qui ont été suivies simultanément et avec la même méthode d'échantillonnage, c'est-à-dire, par comptage des mâles chanteurs. Cette étude a montré que le nombre de sites suivis était trop restreint pour pouvoir évaluer les probabilités de détection et d'occupation pour *Bombina variegata*, et qu'une espèce aussi « rare » nécessite une méthode d'échantillonnage et un protocole de suivi qui soient adaptés à son écologie particulière (Pellet & Schmidt, 2005). Ces résultats nous confortent dans l'idée que notre protocole et notre méthode d'échantillonnage sont pertinents pour le sonneur à ventre jaune et que les modèles de détection et d'occupation sont satisfaisants.

3.3 Remarques et limites du protocole

Il est tout d'abord capital de rappeler que notre analyse porte sur la première année de suivi et qu'il s'agit de la mise en place du protocole. Les résultats que nous avons obtenus sont donc préliminaires et on pourra conclure sur la tendance des populations dans quelques années, après avoir réitéré l'échantillonnage avec une fréquence de 2 ou 3 ans. Un ajustement du protocole sera peut-être nécessaire si le nombre de sites occupés diminue de façon significative.

Notre protocole a été mené à l'échelle de l'Alsace mais pour des contraintes de temps d'échantillonnage et de moyens humains, certaines strates ont été écartées de l'analyse, à savoir, l'Alsace bossue, les collines sous-vosgiennes, le jura alsacien et les Vosges du nord (**Figure 3**). Il serait légitime de dire que notre étude ne reflètera pas, dans les années à venir, une tendance réelle des populations à l'échelle de toute l'Alsace. Cependant, les trois strates étudiées ont les mêmes conditions biogéographiques car elles se situent dans la plaine rhénane, alors que les autres strates se situent dans un autre bassin versant (Alsace bossue, de l'autre côté du massif des Vosges) ou concernent des zones avec une élévation plus importante. Ces conditions biogéographiques particulières auraient pu induire des biais dans les modèles et il aurait fallu inclure d'autres variables dans les analyses.

Dans la même optique, plusieurs variables ont été mises de côté car elles étaient difficilement exploitables dans l'état. Il s'agit des types de substrats géologiques présents aux trois échelles d'analyse (évalué en pourcentage comme l'occupation du sol) et le pourcentage évalué pour chaque type de boisements qui constituent la variable « pourcentage de zones boisées » que nous avons utilisée. En ce qui concerne la géologie, l'analyse d'un degré de rétention de l'eau dans le sol serait plus pertinente qu'une analyse des pourcentages de marnes, de cailloux ou d'alluvions dans une parcelle. On disposerait de nouveaux éléments concernant la caractérisation des habitats fréquentés par le sonneur à ventre jaune, et aussi un degré de pérennité des pièces d'eau, car les substrats argileux forment une couche imperméable alors que les substrats calcaires laissent l'eau s'infiltrer dans le sol. Il en est de même pour les types de boisement, car nous avons montré l'importance des éléments paysagers dans la zone de 1500m autour de la parcelle.

Par ailleurs, les données cartographiques que nous avons utilisées pour calculer les pourcentages d'occupation du sol et les densités de routes et de cours d'eau datent de 2008 (couches SIG fournies par l'IGN et par CIGAL⁹). Les mutations du paysage évoluant très rapidement, il est probable que ces données ne soient pas tout à fait actualisées, et seront de surcroît amenées à changer dans les années à venir.

Enfin, même si le nombre de sites suivis était suffisant pour élaborer des modèles de détection et d'occupation, il n'est pas suffisant pour tester des modèles plus complexes avec des effets additifs des variables ou des interactions entre plusieurs variables. Les modèles que nous avons réalisés manquent de puissance statistique. Un nombre plus important de sites permettrait de remédier à ce problème.

3.4 Implications pour la conservation

Les méthodes d'estimation de la taille des populations par CMR sont souvent coûteuses aussi bien en termes de temps que de moyens humains et financiers, et elles sont en général réservées à des sites de petite dimension. L'utilisation de ces méthodes pour réaliser un suivi à large échelle n'est donc pas envisageable (Pellet & Schmidt, 2005). La méthode de *site occupancy* est une bonne alternative à ces méthodes pour les suivis à large échelle, pour les suivis de plusieurs espèces et pour les espèces rares ou difficiles à détecter (Besnard & Salles, 2010). Les résultats de nombreuses études par *site occupancy* témoignent de l'importance d'estimer la détection plutôt que d'utiliser des informations d'occupation brutes, comme par exemple dans les atlas de répartition, qui ne permettent pas d'évaluer une tendance des populations. La proportion de sites occupés par une espèce semble donc être un bon indicateur pour les suivis à long terme (Bailey *et al.*, 2004). Les résultats de suivis par *site occupancy* menés sur différentes espèces indiquent que les probabilités de détection varient dans le temps, dans l'espace, selon les espèces considérées et selon les méthodes d'échantillonnage adoptées.

⁹ IGN : Institut national de l'information géographique.

CIGAL : Coopération pour l'information géographique en Alsace.

La mise en place d'un protocole adapté pour chaque espèce, avec des répliquats spatiaux ou temporels, est donc primordiale si l'on veut conduire ce genre d'études (Bailey *et al.*, 2004).

Notre étude permet d'ajouter une pierre à l'édifice formé par l'ensemble des analyses basées sur les méthodes de *site occupancy*, qui ont été développées depuis les travaux de MacKenzie *et al.* en 2002. Cette étude est la première du genre à avoir été réalisée en Alsace, et elle constitue un état des lieux de la situation du sonneur à ventre jaune dans la plaine rhénane. De plus, notre analyse contribue à remplir les objectifs énoncés dans le Plan régional d'actions Alsace en faveur du sonneur à ventre jaune, à savoir le besoin de connaissances sur l'espèce par la mise en place d'un suivi des populations à l'échelle de la région (Vacher, 2012). La poursuite de l'échantillonnage permettra de suivre le taux d'occupation de l'espèce à l'échelle de l'Alsace, qui est actuellement de 67 parcelles sur 150, soit presque 45%, et d'analyser la tendance des populations dans les années à venir. Ces éléments permettront d'apporter des arguments solides à exposer aux différents acteurs impliqués dans la conservation de *Bombina variegata* en Alsace. Il sera par exemple possible de hiérarchiser des enjeux de conservation pour l'espèce car les modèles d'occupation permettront de comprendre les facteurs responsables d'un déclin ou d'une expansion de l'espèce et de cibler ces localités.

Un objectif encore plus large pourrait être atteint s'il était possible de développer cette méthode et de l'adapter aux autres régions où le sonneur à ventre jaune est présent, en France et ailleurs en Europe. Il serait alors envisageable de concourir à un des objectifs du Plan national d'actions en faveur de *Bombina variegata*, qui est la mise en place d'un suivi de l'espèce à un niveau national (ECOTER, 2011). C'est pourquoi, nous avons souhaité élaborer un protocole qui soit simple dans sa mise en œuvre, facilement reproductible, même par des bénévoles, et qui soit standardisé. Par ailleurs, ce type de suivi standardisé serait difficile à mettre en œuvre pour d'autres espèces d'amphibiens, notamment pour celles dont les individus se regroupent pour se reproduire une seule fois au cours de la saison. Pour les tritons, par exemple, une méthode par piégeage serait plus indiquée. Ces espèces sont notamment prises en compte dans d'autres types de suivi comme dans le protocole POPAMPHIBIEN.

Conclusion

Les résultats de cette étude sont préliminaires car l'objectif était bien de mettre en place un protocole de suivi à large échelle et à long terme des populations de sonneur à ventre jaune. Il s'agit de la première année de suivi et nos résultats constituent un état des lieux du taux d'occupation de l'espèce qui est actuellement de 45% sur les sites de suivi. L'objectif est d'observer les variations dans le temps de ce taux d'occupation pour évaluer une tendance des populations dans un contexte de déclin des amphibiens. Par ailleurs, ce suivi permettrait d'évaluer l'impact des changements climatiques sur la modification des habitats favorables pour le sonneur, car l'espèce présente une forte sensibilité à la température, et les changements globaux pourraient l'amener à modifier sa répartition, vers des forêts avec une canopée plus dense ou vers des forêts situées plus en altitude.

Par ailleurs, nos résultats révèlent la difficulté de mettre en place un protocole à large échelle qui soit économe en termes de temps et de moyens sans avoir recourt à des méthodes classiques de suivis de populations d'amphibiens. Un suivi par *site occupancy* se révèle indispensable pour entreprendre des suivis à large échelle d'espèces à la biologie complexe. Notre étude est la première du genre à être menée en Alsace et les résultats que nous avons obtenus sont encourageants. Ils laissent penser que la méthode et le protocole sont satisfaisants et adaptés à l'étude du sonneur à ventre jaune.

Le protocole gagnerait cependant à être ajusté au cours du temps, si le taux d'occupation diminue de façon significative. De plus, l'augmentation du nombre de sites de suivis permettrait d'augmenter la puissance statistique des modèles de détection et d'occupation et permettrait de tester des effets additifs ou des interactions entre les variables. En outre, des analyses complémentaires menées sur le degré de rétention de l'eau dans le sol et sur le type de boisement au niveau des parcelles permettrait d'accroître la précision de la caractérisation des habitats fréquentés par le sonneur et permettrait une meilleure interprétation de la tendance des populations.

Nous pensons qu'il serait intéressant de mener ce type d'étude dans les autres régions de France et d'Europe où l'espèce est présente afin de pouvoir comparer les résultats concernant l'occupation, et d'essayer de comprendre dans les années à venir quelle est la tendance des populations et si elle est localisée dans certaines régions ou si un même patron est observé à très grande échelle.

Cette méthode pourrait également être applicable pour le suivi d'autres espèces qui font l'objet d'un Plan national d'actions pour leur conservation, telles que le pélobate brun, *Pelobates fuscus* (Laurenti, 1768), une espèce particulièrement difficile à observer et le crapaud vert, *Bufo viridis* Laurenti, 1768, une espèce très mobile. Pour ces espèces, un suivi par *site occupancy* serait indiqué pour comprendre les facteurs qui influent sur les probabilités de détection, et pour connaître le taux d'occupation sur les sites de suivi, car d'autres méthodes ne permettraient pas d'évaluer ces paramètres.

Bibliographie

- BAILEY L. L., SIMONS T. R. & POLLOCK K. H., 2004 - Estimating Site Occupancy and Species Detection Probability Parameters for Terrestrial Salamanders. *Ecological Applications*, **14**(3), 692–702.
- BARANDUN J., REYER H.-U. & ANHOLT B., 1997 - Reproductive ecology of *Bombina variegata*: aspects of life history, *Amphibia-Reptilia*, **18**, 347-355.
- BERRONEAU M., BONIFAIT S. & MENAY M., 2010 - Redécouverte du Sonneur à ventre jaune (*Bombina variegata* Linné, 1758) dans le département de la Gironde, 27–34.
- BESNARD A. & SALLES J. M., 2010 – *Suivi scientifique d'espèces animales. Aspects méthodologiques essentiels pour l'élaboration de protocoles de suivis. Note méthodologique à l'usage des gestionnaires de sites Natura 2000*. Rapport DREAL PACA, pôle Natura 2000, 62p.
- COLLINS J.P. & STORFER A., 2003- Global amphibian declines: sorting the hypotheses, *Diversity and Distributions*, **9**, 89-98.
- COUVET D. & TEYSSÈDRE-COUVET A., 2010 – *Écologie et biodiversité*, éditions Belin, Péronnas (ed.), 336p.
- DUGUET R. & MELKI F., ACEMAV coll., 2003- *Les Amphibiens de France, Belgique et Luxembourg*, éditions Biotope, Mèze (Coll. Parthénopé) (ed.), 480p.
- ECOTER, 2011 - *Plan national d'actions en faveur du Sonneur à ventre jaune (Bombina variegata) : 2011-2015*. Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer / DREAL Lorraine, 1-159.
- GASC J.-P. *et al.*, 1997 - *Atlas of Amphibians and Reptiles in Europe*, Societas Europea Herpetologica & Muséum national d'Histoire naturelle (IEGB/SPN), Paris, (ed.), 496p.
- GOLLMANN B. & GOLLMANN G. 2012- *Die Gelbbauchunke*. Laurenti Verlag, Bielefeld.
- HARTEL T., MOGA C.I. & NEMES S., 2005 - Use of temporary ponds by amphibians in a wooded pasture, Romania, *Biota*, 21-28.

- HAYES T.B., FALSO P., GALLIPEAU S. & STICE M., 2010 - The cause of global amphibian declines: a developmental endocrinologist's perspective, *The Journal of Experimental Biology*, **213**, 921-933.
- IUCN Red List of Threatened Species/Amphibians analysis:
<http://www.iucnredlist.org/initiatives/amphibians/analysis>, consulté le 13/08/13
- KENDALL W. L. & WHITE G. C., 2009 – A cautionary note on substituting subunits for repeated temporal sampling in studies of site occupancy, *Journal of Applied Ecology*, **46**, 1182-1188.
- LESCURE J. & MASSARY de J.-C. (coords.), 2012 – *Atlas des Amphibiens et Reptiles de France*, Biotope, Mèze & Muséum national d'Histoire naturelle, Paris (Coll. Inventaires & biodiversité) (ed.), 272p.
- LESCURE J., PICHENOT J. & COCHARD P.-O., 2011 – Régression de *Bombina variegata* (Linné, 1758) en France par l'analyse de sa répartition passée et présente, *Bulletin de la Société Herpétologique de France*, **137**, 5-41.
- MacKENZIE D. I. & BAILEY L. L., 2004 - Assessing the fit of site-occupancy models. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, **9**(3), 300–318.
- MacKENZIE D. I. & ROYLE J. A., 2005 - Designing occupancy studies: general advice and allocating survey effort. *Journal of Applied Ecology*, **42**(6), 1105–1114.
- MacKENZIE D. I., NICHOLS J. D., LACHMAN G. B., DROEGE S., ROYLE J. A. & LANDTIMM C. A., 2002 – Estimating occupancy rates when detection probabilities are less than one, *Ecology*, **83**(8), 2248-2255.
- MacKENZIE D. I., NICHOLS J. D., SEAMANS M. E. & GUTIÉRREZ R. J., 2009 – Modeling species occurrence dynamics with multiple states and imperfect detection, *Ecology*, **90**(3), 823-835.
- MURATET J., 2008 - *Identifier les Amphibiens de France métropolitaine*, *Guide de Terrain*, Ecodiv, Graulhet, (ed.), 291p.
- NICHOLS J. D., BAILEY L. L., O'CONNELL Jr. A. F., TALANCY N. W., CAMPBELL GRANT E. H., GILBERT A. T., ANNAND E. M., HUSBAND T. P. & HINES J. E., 2008 - Multi-scale occupancy estimation and modelling using multiple detection methods, *Journal of Applied Ecology*, **45**, 1321–1329.

PELLET J. & SCHMIDT B. R., 2005 - Monitoring distributions using call surveys: estimating site occupancy, detection probabilities and inferring absence, *Biological Conservation*, **123**, 27–35.

PICHENOT J., 2008 - *Contribution à la Biologie de la Conservation du Sonneur à ventre jaune (Bombina variegata L.), Ecologie spatiale et approche multi-échelles de la sélection de l'habitat en limite septentrionale de son aire de répartition*. Thèse pour l'acquisition du grade de Docteur de l'Université de Reims Champagne-Ardenne, Spécialité Biologie de la Conservation, 1-191.

PROTOCOLE POPAMPHIBIEN

<http://lashf.fr/Dossiers/2012/f%C3%A9vrier/Protocole%20POPAMPHIBIEN%20ABONDANCE%20ESPECES%20CIBLES.pdf>, consulté le 23/08/2013

THIRIET J. & VACHER J.-P. (coords.), 2010 - *Atlas des Amphibiens et Reptiles d'Alsace*. BUFO, Colmar / Strasbourg, 273p.

TYRE A. J., TENHUMBERG B., FIELD S. A., NIEJALKE D., PARRIS K. & POSSINGHAM H. P., 2003 - Improving Precision and Reducing Bias in Biological Surveys: Estimating False-Negative Error Rates. *Ecological Applications*, **13**(6), 1790–1801.

VACHER J.-P., 2012 - *Le sonneur à ventre jaune (Bombina variegata). Plan Régional d'Actions Alsace 2012-2016*. BUFO / DREAL Alsace, 1-35.

WAKE D.B., 1991, Declining Amphibian Populations, *Science*, **253**, 860-.

WAKE D.B & VREDENBURG V.T., 2008, Are we in the midst of the sixth mass extinction? A view from the world of amphibians, *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)*, **105**, 11466-11473.

WEIR L. A, ROYLE J. A., NANJAPPA P. & JUNG R. E., 2005 - Modeling Anuran Detection and Site Occupancy on North American Amphibian Monitoring Program (NAAMP) Routes in Maryland, *Journal of Herpetology*, **39**(4), 627–639.

Table des figures

Figure 1 – Photographie d'un sonneur à ventre jaune, <i>Bombina variegata</i> . ©Julie Lambrey	i
Figure 2 – Cartes de répartition de <i>Bombina variegata</i> en Alsace, A) d'après une analyse par mailles des données de 1997 à 2007, Source : (Thiriet & Vacher, 2010) ; et B) d'après une analyse des données précises de présence de l'espèce, de 1997 à 2012, Source : Fonds de carte ©IGN, données ©BUFO et ©Faune-Alsace, réalisation ©Julie Lambrey.....	4
Figure 3 - Localisation des 150 parcelles échantillon (carrés rouges) et des unités paysagères de référence (liserés colorés), à l'échelle de l'Alsace. Source : fonds de carte ©IGN, réalisation ©Julie Lambrey.	7
Figure 4 - Représentation schématique d'une parcelle échantillon (contour noir épais) et des quadrants (contours en pointillés) qui sont tirés aléatoirement (en gris) pour l'échantillonnage.....	8
Figure 5 - Représentation graphique des contributions de chaque variable à la création des quatre premiers axes, pour l'ACP réalisée à l'échelle d'analyse "parcelle".	11
Figure 6 - Représentation graphique des contributions de chaque variable à la création des quatre premiers axes, pour l'ACP réalisée à l'échelle d'analyse "zone tampon d'un rayon de 500m autour de la parcelle".	12
Figure 7 - Représentation graphique des contributions de chaque variable à la création des quatre premiers axes, pour l'ACP réalisée à l'échelle d'analyse "zone tampon d'un rayon de 1500m autour de la parcelle".	13
Figure 8 - Relations significatives entre les probabilités de détection p du sonneur à ventre jaune par unité d'échantillonnage et deux variables environnementales dans la plaine rhénane : A) Nombre de pièces d'eau dans l'unité d'échantillonnage (placette) ; B) Température ambiante au cours de l'échantillonnage du sonneur.....	15
Figure 9 - Relations significatives entre les probabilités d'occupation ψ d'une parcelle par le sonneur à ventre jaune et quatre variables environnementales dans la plaine rhénane : A) Pourcentage de prairies dans une zone tampon d'un rayon de 1500m autour de la parcelle ; B) Densité de chemins au sein de la parcelle ; C) Densité de routes dans une zone tampon d'un rayon de 1500m autour de la parcelle ; D) Pourcentage de surface urbanisée dans une zone tampon d'un rayon de 1500m autour de la parcelle.	16

Liste des tableaux

Tableau I : Pourcentages de variance expliquée par chaque composante de l'ACP (comp 1 à 7) et contribution de chaque variable à la création des quatre premiers axes (Dim 1 à 4) pour le niveau d'analyse « parcelle »

Abréviations : ch = densité de chemins; ro = densité de routes; ce = densité de cours d'eau; ZU = % de zones urbaines; ZA = densité de zones agricoles; ZP = densité de zones prairiales; ZB = densité de zones boisées; eau = nombre d'ornières (variable mesurée uniquement pour l'échelle d'analyse « parcelle»).....11

Tableau II : Pourcentages de variance expliquée par chaque composante de l'ACP (comp 1 à 7) et contribution de chaque variable à la création des quatre premiers axes (Dim 1 à 4) pour le niveau d'analyse « zone tampon de 500m autour de la parcelle »

Abréviations : ch = densité de chemins; ro = densité de routes; ce = densité de cours d'eau; ZU = % de zones urbaines; ZA = densité de zones agricoles; ZP = densité de zones prairiales; ZB = densité de zones boisées; eau = nombre d'ornières (variable mesurée uniquement pour l'échelle d'analyse « parcelle»).....12

Tableau III : Pourcentages de variance expliquée par chaque composante de l'ACP (comp 1 à 7) et contribution de chaque variable à la création des quatre premiers axes (Dim 1 à 4) pour le niveau d'analyse « zone tampon de 1500m autour de la parcelle »

Abréviations : ch = densité de chemins; ro = densité de routes; ce = densité de cours d'eau; ZU = % de zones urbaines; ZA = densité de zones agricoles; ZP = densité de zones prairiales; ZB = densité de zones boisées; eau = nombre d'ornières (variable mesurée uniquement pour l'échelle d'analyse « parcelle»).....13

Tableau IV : Matrice des corrélations des variables explicatives prises deux à deux.

Abréviations : ch = densité de chemins; ro = densité de routes; ce = densité de cours d'eau; ZU = % de zones urbaines; ZA = densité de zones agricoles; ZP = densité de zones prairiales; ZB = densité de zones boisées; eau = nombre d'ornières (variable mesurée uniquement pour l'échelle d'analyse « parcelle»).....14

Liste des Annexes

Annexe A : Hiérarchisation des modèles de détection

Abréviations : w (water) = nombre d'ornières dans les quadrants ; t (temperature) = température de l'air au moment de l'échantillonnage..... V

Annexe B : Sélection des relations significatives d'occupation (1/3)

Abréviations : CH = densité de chemins ; RO = densité de routes ; CE = densité de cours d'eau ; ZU = % de zones urbaines ; ZA = % de zones agricoles ; ZP = % de zones prairiales ; ZB = % de zones boisées ; WA = nombre de pièces d'eau dans la parcelle. Seuils de significativité : • $\alpha = 0,05$; * $\alpha = 0,01$; ** $\alpha = 0,001$; *** $\alpha < 0,001$ VI

Annexe B : Sélection des relations significatives d'occupation (2/3)

Abréviations : CH = densité de chemins ; RO = densité de routes ; CE = densité de cours d'eau ; ZU = % de zones urbaines ; ZA = % de zones agricoles ; ZP = % de zones prairiales ; ZB = % de zones boisées ; WA = nombre de pièces d'eau dans la parcelle. Seuils de significativité : • $\alpha = 0,05$; * $\alpha = 0,01$; ** $\alpha = 0,001$; *** $\alpha < 0,001$ VII

Annexe B : Sélection des relations significatives d'occupation (3/3)

Abréviations : CH = densité de chemins ; RO = densité de routes ; CE = densité de cours d'eau ; ZU = % de zones urbaines ; ZA = % de zones agricoles ; ZP = % de zones prairiales ; ZB = % de zones boisées ; WA = nombre de pièces d'eau dans la parcelle. Seuils de significativité : • $\alpha = 0,05$; * $\alpha = 0,01$; ** $\alpha = 0,001$; *** $\alpha < 0,001$ VIII

Annexe A : Hiérarchisation des modèles de détection

Abréviations : w (water) = nombre d'ornières dans les quadrants ; t (temperature) = température de l'air au moment de l'échantillonnage.

r	Model	AIC	w	Parameters					
				$\hat{\psi}$	$\hat{\rho}$				
1	$\psi[.]$, p[lg(w)+t ²]	316.02	5	β_0 : 0.86 (0.29)	β_0 : -2.78 (0.47)	β_1 : 2.99 (0.41)	β_2 : 5.47 (2.31)	β_3 : -4.83 (2.25)	-
2	$\psi[.]$, p[lg(w)+ lg(t)]	317.27	4	β_0 : 0.78 (0.28)	β_0 : -2.68 (0.48)	β_1 : 3.04 (0.41)	β_2 : 0.69 (0.29)	-	-
3	$\psi[.]$, p[lg(w)+t]	318.34	4	β_0 : 0.74 (0.28)	β_0 : -2.60 (0.48)	β_1 : 3.04 (0.41)	β_2 : 0.58 (0.28)	-	-
4	$\psi[.]$, p[lg(w)]	320.43	3	β_0 : 0.60 (0.23)	β_0 : -2.34 (0.44)	β_1 : 3.01 (0.40)	-	-	-
5	$\psi[.]$, p[w ² + t ²]	365.20	6	β_0 : 0.82 (0.28)	β_0 : -1.60 (0.23)	β_1 : 4.82 (0.53)	β_2 : 6.08 (2.23)	β_3 : -5.26 (2.13)	β_4 : -3.47 (0.49)
6	$\psi[.]$, p[w ² + log(t)]	368.61	5	β_0 : 0.73 (0.27)	β_0 : -1.41 (0.22)	β_1 : 4.88 (0.53)	β_2 : -3.53 (0.51)	β_3 : 0.64 (0.23)	-
7	$\psi[.]$, p[w ² + t]	370.16	5	β_0 : 0.70 (0.26)	β_0 : -1.36 (0.21)	β_1 : 4.89 (0.53)	β_2 : -3.55 (0.51)	β_3 : 0.52 (0.21)	-
8	$\psi[.]$, p[w ²]	374.25	4	β_0 : 0.58 (0.24)	β_0 : -1.15 (0.19)	β_1 : 4.92 (0.54)	β_2 : -3.59 (0.52)	-	-
9	$\psi[.]$, p[w+t ²]	424.00	5	β_0 : 0.71 (0.28)	β_0 : -1.10 (0.19)	β_1 : 2.01 (0.26)	β_2 : 5.67 (1.92)	β_3 : -4.99 (1.83)	-
10	$\psi[.]$, p[w+log(t)]	428.98	4	β_0 : 0.79 (0.29)	β_0 : -0.94 (0.18)	β_1 : 2.04 (0.26)	β_2 : 0.55 (0.19)	-	-
11	$\psi[.]$, p[w+t]	430.84	4	β_0 : 0.69 (0.28)	β_0 : -0.90 (0.18)	β_1 : 2.05 (0.26)	β_2 : 0.46 (0.18)	-	-
12	$\psi[.]$, p[w]	435.71	3	β_0 : 0.54 (0.26)	β_0 : -0.74 (0.17)	β_1 : 2.03 (0.26)	-	-	-
13	$\psi[.]$, p[t ²]	537.59	4	β_0 : 0.21 (0.23)	β_0 : -0.69 (0.17)	β_1 : 6.34 (1.6)	β_2 : -5.87 (1.56)	-	-
14	$\psi[.]$, p[lg(t)]	549.06	3	β_0 : 0.09 (0.23)	β_0 : -0.51 (0.17)	β_1 : 0.45 (0.19)	-	-	-
15	$\psi[.]$, p[t]	551.05	3	β_0 : 0.03 (0.22)	β_0 : -0.45 (0.18)	β_1 : 0.33 (0.20)	-	-	-
16	$\psi[.]$, p[.]	551.57	2	β_0 : -0.09 (0.19)	β_0 : -0.28 (0.15)	-	-	-	-

Annexe B : Sélection des relations significatives d'occupation (1/3)

Abréviations : CH = densité de chemins ; RO = densité de routes ; CE = densité de cours d'eau ; ZU = % de zones urbaines ; ZA = % de zones agricoles ; ZP = % de zones prairiales ; ZB = % de zones boisées ; WA = nombre de pièces d'eau dans la parcelle.
 Seuils de significativité : . $\alpha = 0,05$; * $\alpha = 0,01$; ** $\alpha = 0,001$; *** $\alpha < 0,001$.

PATCH SCALE			Occupation			Detection		
Model	AIC	np	β_0	β_1	β_2	β_0	β_1	β_2
$\psi[CH]$	313,4629	6	1.38 (0.664) *	-1.09 (0.758)	-	-2.97 (0.460) ***	2.95 (0.409) ***	6.89 (2.195) *
$\psi[RO]$	317,9552	6	0.8720 (0.299) *	-0.0715 (0.272)	-	-2.79 (0.475) ***	2.99 (0.413) ***	5.63 (2.250) .
$\psi[CE]$	317,6697	6	0.875 (0.296) *	0.182 (0.320)	-	-2.78 (0.471) ***	2.98 (0.411) ***	5.68 (2.303) .
$\psi[ZU]$	316,0018	6	0.916 (0.312) *	1.145 (1.222) .	-	-2.73 (0.476) ***	2.99 (0.412) ***	5.41 (2.352) .
$\psi[ZA]$	317,8625	6	0.830 (0.294) *	-0.131 (0.312)	-	-2.76 (0.475) ***	2.98 (0.411) ***	5.51 (2.324) .
$\psi[ZP]$	317,9804	6	0.8512 (0.293) *	-0.0724 (0.343)	-	-2.77 (0.476) ***	2.98 (0.413) ***	5.58 (2.313) .
$\psi[ZB]$	316,5947	6	0.940 (0.325) *	-0.404 (0.384)	-	-2.82 (0.485) ***	3.01 (0.423) ***	5.53 (2.289) .
$\psi[WA]$	317,8353	6	0.930 (0.345) *	-0.103 (0.238)	-	-2.81 (0.485) ***	3.00 (0.418) ***	5.54 (2.280) .
$\psi[\log(CH)]$	308,9522	6	1.6 (0.571) *	1.7 (0.754) .	-	-2.96 (0.457) ***	2.96 (0.408) ***	6.90 (2.175) *
$\psi[(\log)(RO)]$	317,4800	6	0.827 (0.288) *	-0.184 (0.258)	-	-2.75 (0.479) ***	2.99 (0.414) ***	5.37 (2.362) .
$\psi[(\log)(CE)]$	317,9508	6	0.8507 (0.291) *	-0.0688 (0.256)	-	-2.77 (0.475) ***	2.99 (0.413) ***	5.57 (2.314) .
$\psi[(\log)(ZU)]$	316,5603	6	0.834 (0.285) *	0.373 (0.372)	-	-2.74 (0.476) ***	2.99 (0.412) ***	5.43 (2.348) .
$\psi[(\log)(ZA)]$	317,6823	6	0.823 (0.289) *	-0.173 (0.282)	-	-2.75 (0.473) ***	2.98 (0.410) ***	5.52 (2.324) .
$\psi[(\log)(ZP)]$	318,015	6	0.8600 (0.292) *	-0.0247 (0.276)	-	-2.75 (0.475) ***	2.99 (0.413) ***	5.58 (2.311) .
$\psi[(\log)(ZB)]$	316,8712	6	0.944 (0.339) *	-0.457 (0.576)	-	-2.82 (0.484) ***	3.01 (0.421) ***	5.55 (2.290) .
$\psi[(\log)(WA)]$	317,2924	6	1.026 (0.384) *	-0.241 (0.293)	-	-2.85 (0.491) ***	3.03 (0.423) ***	5.44 (2.280) .
$\psi[CH_2]$	313,1881	7	1.06 (0.388) *	-2.25 (1.043) .	-1.85 (1.024)	-2.86 (0.459) ***	2.95 (0.406) ***	6.49 (2.252) *
$\psi[RO_2]$	317,1713	7	0.765 (0.298) .	2.803 (2.348)	-3.678 (2.931)	-2.77 (0.481) ***	2.99 (0.416) ***	5.48 (2.350) .
$\psi[CE_2]$	318,6753	7	0.829 (0.289) *	0.900 (0.787)	-0.861 (0.815)	-2.76 (0.476) ***	2.99 (0.415) ***	5.60 (2.330) .
$\psi[ZU_2]$	317,9846	7	1.136 (1.71)	0.744 (3.05)	2.691 (2.18)	-2.74 (0.476) ***	2.99 (0.412) ***	5.42 (2.351) .
$\psi[ZA_2]$	318,7089	7	0.882 (0.328) *	-1.119 (0.987)	1.252 (1.392)	-2.76 (0.472) ***	2.98 (0.410) ***	5.61 (2.318) .
$\psi[ZP_2]$	319,9783	7	0.844 (0.323) *	-0.030 (0.950)	-0.068 (1.395)	-2.77 (0.481) ***	2.98 (0.414) ***	5.56 (2.328) .
$\psi[ZB_2]$	318,4756	7	0.916 (0.322) *	0.230 (1.747)	-0.595 (1.644)	-2.82 (0.486) ***	3.01 (0.423) ***	5.50 (2.301) .
$\psi[WA_2]$	319,5914	7	0.878 (0.351) .	0.271 (0.792)	-0.339 (0.687)	-2.80 (0.483) ***	2.98 (0.417) ***	5.62 (2.265) .
								-4.86 (2.212) .
								-4.75 (2.241) .
								-4.83 (2.265) .
								-4.85 (2.260) .
								-4.71 (2.284) .
								-4.88 (2.277) .
								-4.77 (2.282) .
								-5.63 (2.206) .
								-4.72 (2.222) .
								-4.80 (2.236) .
								-4.84 (2.253) .
								-4.79 (2.265) .
								-4.72 (2.282) .
								-4.83 (2.257) .
								-4.67 (2.292) .
								-5.94 (2.143) *
								-4.80 (2.226) .
								-4.78 (2.234) .
								-4.84 (2.255) .
								-4.78 (2.264) .
								-4.70 (2.286) .
								-4.93 (2.250) .
								-4.88 (2.250) .
								-5.92 (2.151) *

Annexe B : Sélection des relations significatives d'occupation (2/3)

Abréviations : CH = densité de chemins ; RO = densité de routes ; CE = densité de cours d'eau ; ZU = % de zones urbaines ; ZA = % de zones agricoles ; ZP = % de zones prairiales ; ZB = % de zones boisées ; WA = nombre de pièces d'eau dans la parcelle.

Seuils de significativité : . $\alpha = 0,05$; * $\alpha = 0,01$; ** $\alpha = 0,001$; *** $\alpha < 0,001$.

500m SCALE			Occupation			Detection			
Model	AIC	np	β_0	β_1	β_2	β_0	β_1	β_2	β_3
ψ [CH]	317.5576	6	0.905 (0.319)*	0.207 (0.318)	-	-2.82 (0.476)***	2.98 (0.414)***	5.88 (2.295) .	-5.09 (2.233) .
ψ [RO]	315.0134	6	0.886 (0.300)*	-0.426 (0.250)	-	-2.77 (0.468)***	2.98 (0.410)***	5.49 (2.261) .	-4.72 (2.216) .
ψ [CE]	318.0057	6	0.855 (0.294)*	0.034 (0.259)	-	-2.77 (0.475)***	2.99 (0.413)***	5.57 (2.311) .	-4.83 (2.254) .
ψ [ZU]	317.1586	6	0.860 (0.298)*	0.261 (0.300)	-	-2.78 (0.478)***	2.99 (0.415)***	5.55 (2.310) .	-4.79 (2.250) .
ψ [ZA]	315.3267	6	0.775 (0.282)*	-0.438 (0.251)	-	-2.71 (0.472)***	2.98 (0.409)***	5.40 (2.355) .	-4.70 (2.291) .
ψ [ZP]	317.9964	6	0.8683 (0.297)*	0.0473 (0.294)	-	-2.78 (0.476)***	2.99 (0.414)***	5.60 (2.313) .	-4.85 (2.254) .
ψ [ZB]	317.4765	6	0.898 (0.308)*	-0.207 (0.289)	-	-2.80 (0.478)***	2.99 (0.416)***	5.67 (2.295) .	-4.91 (2.237) .
ψ [log(CH)]	317.1969	6	0.921 (0.326)*	0.264 (0.302)	-	-2.82 (0.475)***	2.98 (0.413)***	5.95 (2.278)*	-5.15 (2.218) .
ψ [(log(RO))]	317.9281	6	0.8619 (0.292)*	0.0774 (0.255)	-	-2.78 (0.475)***	2.99 (0.414)***	5.65 (2.311) .	-4.90 (2.253) .
ψ [(log(CE))]	317.3801	6	0.316 (0.313)*	0.336 (0.464)	-	-2.79 (0.474)***	2.99 (0.413)***	5.68 (2.318) .	-4.96 (2.258) .
ψ [(log(ZU))]	316.5745	6	0.871 (0.302)*	0.313 (0.276)	-	-2.78 (0.475)***	2.98 (0.414)***	5.68 (2.294) .	-4.90 (2.234) .
ψ [(log(ZA))]	316.7199	6	0.794 (0.285)	-0.332 (0.265)	-	-2.73 (0.477)***	2.99 (0.413)***	5.38 (2.347) .	-4.68 (2.281) .
ψ [(log(ZP))]	317.7041	6	0.520 (0.659)	-0.326 (0.583)	-	-2.77 (0.475)***	2.99 (0.414)***	5.54 (2.302) .	-4.80 (2.246) .
ψ [(log(ZB))]	317.6436	6	0.888 (0.304)*	-0.171 (0.288)	-	-2.80 (0.478)***	2.99 (0.416)***	5.65 (2.298) .	-4.90 (2.240) .
ψ [CH ²]	318.4860	7	0.894 (0.313)*	1.811 (1.526)	-1.684 (1.531)	-2.79 (0.473)***	2.98 (0.411)***	5.78 (2.313) .	-5.00 (2.249) .
ψ [RO ²]	315.0834	7	0.952 (0.329)*	-1.333 (0.762)	0.865 (0.671)	-2.78 (0.464)***	2.97 (0.408)***	5.65 (2.211) .	-4.85 (2.178) .
ψ [CE ²]	319.6539	7	0.871 (0.302)*	-0.504 (0.983)	0.523 (0.913)	-2.78 (0.478)***	2.99 (0.413)***	5.54 (2.311) .	-4.80 (2.253) .
ψ [ZU ²]	318.1179	7	0.851 (0.298)*	1.001 (0.811)	-0.884 (0.866)	-2.75 (0.472)***	2.97 (0.411)***	5.61 (2.306) .	-4.86 (2.245) .
ψ [ZA ²]	317.2926	7	0.771 (0.282)*	-0.570 (0.751)	0.144 (0.771)	-2.70 (0.472)***	2.98 (0.409)***	5.36 (2.366) .	-4.65 (2.301) .
ψ [ZP ²]	318.1136	7	1.25 (0.539) .	-1.70 (1.486)	2.92 (2.665)	-2.86 (0.468)***	3.00 (0.416)***	6.00 (2.197)*	-5.17 (2.165) .
ψ [ZB ²]	319.3123	7	0.893 (0.308)*	0.392 (1.500)	-0.601 (1.488)	-2.79 (0.477)***	2.98 (0.415)***	5.65 (2.300) .	-4.89 (2.239) .

Annexe B : Sélection des relations significatives d'occupation (3/3)

Abréviations : CH = densité de chemins ; RO = densité de routes ; CE = densité de cours d'eau ; ZU = % de zones urbaines ; ZA = % de zones agricoles ; ZP = % de zones prairiales ; ZB = % de zones boisées ; WA = nombre de pièces d'eau dans la parcelle.
 Seuils de significativité : . $\alpha = 0,05$; * $\alpha = 0,01$; ** $\alpha = 0,001$; *** $\alpha < 0,001$.

1500m SCALE		Occupation			Detection		
Model	AIC	np	β_0	β_1	β_2	β_1	β_2
$\psi[CH]$	318,0219	6	0.0277 (1097)	-0.1991 (262)	-	2.99 (0.414)***	5.57 (2.319) .
$\psi[RO]$	314,1114	6	0.870 (0.301)*	-0.536 (0.279)	-	2.99 (0.412)***	5.10 (2.346) .
$\psi[CE]$	317,8922	6	0.8431 (0.294)*	0.0901 (0.250)	-	2.98 (0.412)***	5.57 (2.318) .
$\psi[ZU]$	312,6983	6	0.796 (0.292)*	-0.640 (0.279) .	-	2.98 (0.410)***	4.63 (2.458) .
$\psi[ZA]$	314,4894	6	0.975 (0.339)*	0.530 (0.306)	-	2.99 (0.419)***	5.92 (2.241)*
$\psi[ZP]$	317,5843	6	0.858 (0.292)*	-0.167 (0.249)	-	2.99 (0.414)***	5.57 (2.305) .
$\psi[ZB]$	316,5597	6	0.929 (0.320)*	-0.340 (0.291)	-	2.98 (0.416)***	5.91 (2.264)*
$\psi[\log(CH)]$	317,6792	6	0.867 (0.289)*	-0.154 (0.261)	-	2.99 (0.413)***	5.48 (2.321) .
$\psi[\log(RO)]$	312,9455	6	0.964 (0.317)*	-0.724 (0.355) .	-	2.99 (0.413)***	5.43 (2.267) .
$\psi[\log(CE)]$	318,0190	6	0.861 (0.292)*	-0.028 (0.448)	-	2.99 (0.414)***	5.57 (2.307) .
$\psi[\log(ZU)]$	312,4735	6	0.826 (0.294)*	-0.627 (0.271) .	-	2.98 (0.409)***	4.77 (2.429) .
$\psi[\log(ZA)]$	316,2285	6	0.315 (0.315)*	0.354 (0.266)	-	2.97 (0.415)***	5.93 (2.262)*
$\psi[\log(ZP)]$	316,5628	6	0.901 (0.302)*	-0.383 (0.332)	-	3.00 (0.416)***	5.67 (2.270) .
$\psi[\log(ZB)]$	316,7653	6	0.924 (0.318)*	-0.317 (0.300)	-	2.99 (0.417)***	5.88 (2.268)*
$\psi[CH]$	319,337	7	0.0498 (3561,48)	-0.1974 (851,219)	-0.1999 (0.843)	2.99 (0.413)***	5.44 (2.319) .
$\psi[RO]$	315,8630	7	0.898 (0.311)*	-0.863 (0.733)	0.396 (0.816)	2.99 (0.412)***	5.24 (2.355) .
$\psi[CE]$	317,1240	7	0.932 (0.318)*	-1.816 (1.347)	1.932 (1.389)	2.98 (0.408)***	5.73 (2.254) .
$\psi[ZU]$	314,4999	7	0.814 (0.297)*	-0.875 (0.592)	0.316 (0.682)	2.98 (0.409)***	4.68 (2.466) .
$\psi[ZA]$	315,0788	7	1.078 (0.402)*	-0.745 (1.149)	1.508 (1.381)	3.02 (0.429)***	5.68 (2.253) .
$\psi[ZP]$	309,9776	7	1.31 (0.455)*	-5.29 (2.331) .	5.31 (2.494) .	3.00 (0.416)***	6.23 (2.138)*
$\psi[ZB]$	318,4140	7	0.920 (0.318)*	0.257 (1.577)	-0.606 (1.582)	2.97 (0.415)***	5.94 (2.264)*

Résumé

La problématique concernant le déclin global des amphibiens a engendré un besoin grandissant de mener des suivis de populations pour comprendre les raisons de leur régression. Notre étude tente de répondre aux objectifs du Plan régional d'actions Alsace en faveur de *Bombina variegata*, par la mise en place d'un suivi standardisé des populations à l'échelle de l'Alsace et à long terme, grâce à l'utilisation de méthodes récentes de *site occupancy*. Les résultats préliminaires montrent que l'occurrence du sonneur dépend d'éléments paysagers à proximité des sites de suivi et que la probabilité de détection du sonneur serait liée aux conditions d'échantillonnage et aux caractéristiques physiques des sites de suivi. L'évaluation du taux d'occupation du sonneur au cours du temps nous fournira un bon indicateur de la tendance des populations (actuellement 45% des sites suivis) et il serait intéressant de mener ce type d'étude dans les autres régions où l'espèce est présente afin de pouvoir évaluer la tendance des populations à une plus large échelle.

Summary

Evidence of a global scale amphibians decline generated an increasing need to promote population monitoring in order to understand the reasons of their regression. Our study tries to answer the objectives of the Alsace regional action Plan in favor of *Bombina variegata*, by the implementation of a standardized population monitoring at the scale of the Alsace scale and in the long term, thanks to the use of recent methods of site occupancy modeling. The preliminary results show that the occurrence of the yellow-bellied toad depends on landscape elements near the surveyed sites and that its detection probability of the yellow-bellied toad would be influenced by some sampling conditions and by physical characteristics of the sites. Evaluation of occupation rate of the yellow-bellied toad across time will supply a good indicator of the populations trend (at present 45 % of sites surveyed) and it would be interesting to carry out this kind of monitoring in the other regions where the specie is present, to be able to estimate the populations trend on a larger scale.