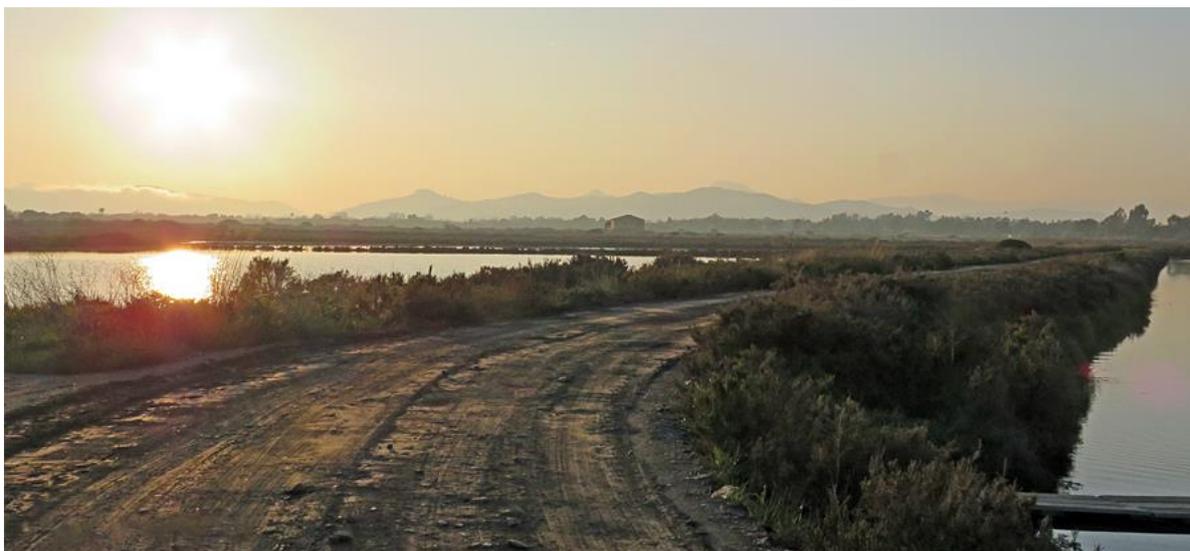


Effets de la gestion hydraulique sur les populations de Laro-limicoles du salin des Pesquiers et des Vieux Salins d'Hyères



Mémoire de fin d'études

Dominante d'approfondissement : Gestion des Milieux Naturels (GMN)

Illustration de couverture :

En haut : Salin des Pesquiers au soleil couchant.

En bas : Bécasseau falcinelle (*Limicola falcinellus*) sur le Salin des Pesquiers.

Source de l'iconographie : Stanislas Wroza, sauf mention contraire

RAPPORT DE STAGE

WROZA Stanislas

Dans le cadre du stage de **3^{ème} année** :

Stage effectué du 27/02/2017 au 27/08/2017

À : Equipe Biogéographie et Ecologie des Vertébrés, Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, CNRS, 1919 Route de Mende, 34293 Montpellier 5

Et

Parc national de Port Cros et Communauté d'Agglomération de Toulon Provence Méditerranée, site des Salins d'Hyères,

Sur le thème : Effets de la gestion hydraulique sur les populations de Laro-limicoles du salin des Pesquiers et des Vieux Salins d'Hyères

Eventuellement, rapport confidentiel : Date d'expiration de confidentialité :
.....

Enseignant-tuteur responsable :

Enseignant-tuteur associé : François LEBOURGEOIS.

Rappel : dans ce cas fournir un 2^{ème} exemplaire du rapport

Maître de stage : Jean-Yves BARNAGAUD, Matthieu LASCEVE et David GEOFFROY

Engagement de non plagiat

Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris à autrui.
- Le plagiat de tout ou parties de documents existants constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée
- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et illustrations.
- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux : Ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive. Recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire, en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties l'intéressant mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.
- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.
- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de très courts passages in extenso, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et bien sûr d'en citer la source.

Sanction : En cas de manquement à ces consignes, la DEVE/le correcteur se réservent le droit d'exiger la réécriture du document sans préjuger d'éventuelles sanctions disciplinaires.

Engagement :

Je soussigné (e) Stanislas WROZA

Reconnaît avoir lu et m'engage à respecter les consignes de non plagiat

A Montpellier le 21/07/2017

Signature :

Résumé

Consacrés à la production de sel jusqu'en 1995, les salins d'Hyères sont aujourd'hui propriété du Conservatoire de l'Espace Littoral et des Rivages Lacustres et constituent un réservoir de biodiversité reconnu zone humide d'intérêt international au titre de la convention de Ramsar. La gestion est assurée par la Communauté d'Agglomération Toulon Provence Méditerranée avec l'appui scientifique du Parc national de Port Cros. Elle est dédiée à la conservation des paysages et de la biodiversité des deux sites géographiquement séparés composant les salins. Pourtant, l'impact de la gestion hydraulique sur l'avifaune n'y a encore jamais fait l'objet d'analyses approfondies. La présente étude vise à quantifier l'effet de la hauteur d'eau, de la salinité et de la concentration en oxygène dissous sur neuf espèces de Laro-limicoles nicheuses présentant des enjeux de conservation régionaux ou nationaux. Ces trois paramètres sont modulables à travers le réseau hydraulique. Notre étude s'appuie sur un jeu de données issu de trois années de comptages ornithologiques et de suivis physico-chimiques standardisés. Pour chaque espèce nous utilisons un modèle hiérarchique pour déterminer la réponse des espèces cibles aux trois paramètres étudiés. Les résultats montrent une divergence dans l'attractivité et les fonctions des deux salins composant la zone d'étude. Les abondances maximales sont atteintes pour des valeurs de paramètres différentes sur les zones de reproduction et d'alimentation. Nous montrons que les marais salants concentrent l'avifaune malgré des salinités qui lui sont localement hostiles et des conditions écologiques extrêmes, ce qui se traduit par une réponse négative à la salinité pour une majorité d'espèces. Nos résultats permettent d'optimiser la gestion hydraulique afin de favoriser les populations de Laro-limicoles de ce site patrimonial d'intérêt régional. Le maintien d'une salinité plus faible sur certains bassins permet d'assurer l'attractivité des salins pour l'avifaune, confortant leur statut de zone refuge à l'échelle du bassin méditerranéen.

Abstract

Hyères saltpans were dedicated to salt production until 1995. They now belong to the Conservatoire de l'Espace Littoral et des Rivages Lacustres. This internationally-important wetland is recognized as a biosphere reserve by the RAMSAR Convention on Wetlands. It is maintained jointly by Toulon city and Port Cros national park as an area dedicated to bird and natural habitat conservation. The impact of water regulation on the birds frequenting this site has never been studied yet. In the present report, we quantify the effect of three main physico-chemical parameters on nine bird species of national or regional conservation concern. We focus on three parameters that can be modulated through a regulation of the hydraulic network: - water level, salinity, and oxygen concentration. Our study relies on a three-years bird count survey associated with physico-chemical measurement. We analyze the influence of the three parameters on variations in bird abundances using a multispecies hierarchical model within a Bayesian framework. The results show that the two saltpans encompassed in our study differ in their attractiveness and ecological functions, in relation with their respective use as a breeding and foraging areas by birds. We further show that saltpans concentrate birds in spite of hostile salinity levels for most species. Our results enable us to compare different management scenarios. They raise the interest of maintaining a lower salinity on certain basins for conservation purposes.

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué directement ou indirectement au succès de ce stage.

Mes remerciements vont d'abord à mes tuteurs : Jean-Yves Barnagaud, David Geoffroy et Matthieu Lascève qui ont veillé au bon déroulement de cette expérience enrichissante.

Jean-Yves Barnagaud pour sa disponibilité et son suivi précieux tout au long de ces six mois, ainsi que pour les bons moments passés sur le terrain en sa compagnie.

David Geoffroy et Matthieu Lascève pour l'organisation logistique du stage et les nombreuses opportunités qu'ils m'ont offertes d'élargir cette expérience à d'autres aspects de la gestion du Parc/du site des salins (séjour sur Porquerolles/ suivis Cistudes ou chiroptères etc...). Le stage en aura été d'autant plus appréciable et enrichissant.

Je tenais également à remercier :

Aurélien Audevard pour m'avoir fait découvrir l'intégralité du site et son avifaune exceptionnelle. Les comptages en sa compagnie resteront mémorables.

Frédérique Gimond-Lanteri pour l'accueil sur le site des Salins et Yann Corbobesse pour la visite de la presqu'île.

Julien Papaix pour son aide sur le modèle statistique.

L'équipe BEV du CEFE pour son l'accueil au sein de ses bureaux.

François Lebourgeois pour l'encadrement AgroParisTech.

Mes collègues Pierrick Devoucoux, Colline Canonne, Benjamin Viel, Alicia Dalongeville, Emilie Boulanger, Julie Fluhr, Pierre Barry, Marco Andrello, Marco Alejandro Escalante, Pauline Couet pour avoir égayé mon quotidien.

Les ornithologues de Montpellier pour les nombreuses sorties à la découverte de la région.



Marouette poussin (Porzana parva) sur les Vieux Salins. Source : Stanislas Wroza.

Table des matières

Résumé.....	5
Abstract	5
Remerciements	6
Table des matières	7
Table des figures.....	9
1. Contexte et objectifs de l'étude	11
1.1 Contexte global.....	11
1.2 Présentation du site des salins d'Hyères.....	12
1.2.1 Aspects géographiques, économiques et statut de conservation	12
1.2.2 Mode de gestion.....	12
1.2.3 Enjeux du site	15
1.3 Contexte du stage.....	15
1.3.1 Objectifs du plan de gestion.....	15
1.3.2 Enjeux en terme de conservation.....	16
1.4 Les Laro-limicoles	17
1.4.1 Intérêt de la population d'étude	17
1.4.2 Caractéristiques écologique des Laro-limicoles	17
1.4.3 Utilisation des deux sites par les Laro-limicoles.....	18
1.5 Un double enjeu gestion/recherche fondamentale.....	19
1.5.1 Objectifs du stage pour les gestionnaire	19
1.5.2 Intérêt scientifique du stage	20
2. Matériels et méthodes	21
2.1 Données exploitées	21
2.1.1 Comptages ornithologiques	21
2.1.2 Relevés physico-chimiques.....	23
2.2 Méthodes : Effets des pratiques de gestion sur les espèces clé	26
2.2.1 Principe du modèle.....	26
2.2.2 Structure mathématique du modèle.....	28
2.2.3 Utilisation de deux modèles : linéaire et quadratique	30
3. Effets des pratiques de gestion sur les espèces clé : résultats.....	32
3.1. Validité du modèle	32
3.2 Effet site.....	33
3.2 Différence entre les Pesquiers et les Vieux Salins.....	33

3.2.2	Différence entre les bassins	34
3.3	Réponses linéaires des espèces aux variables de gestion.....	38
3.3.1	Niveau d'eau.....	38
3.3.2	Salinité	39
3.3.3	Concentration en oxygène dissous.....	40
3.4	Réponses quadratiques	41
3.4.1	Niveau d'eau.....	41
3.4.2	Salinité	46
3.4.3	Concentration en oxygène dissous.....	50
4.	Discussion	54
4.1	Interprétation des résultats	54
4.1.1	Effet site.....	54
4.1.2	Effets du niveau d'eau et différences fonctionnelles entre salin des Pesquiers et Vieux Salins.....	55
4.1.3	Effets de la salinité.	56
4.2	Recommandations pour le gestionnaire	58
4.2.1	Recommandations pour la gestion hydraulique du site	58
4.2.2	Recommandations pour les suivis physico-chimiques ultérieurs.....	59
Conclusion	61
Bibliographie	62
Annexes	67
Annexe 1	: Liste des contacts	67
Annexe 2	: R-hat	68
Annexe 3	: méthodologie pour la partie « Composition, Distribution et Evolution de l'avifaune sur les Salins. »	70
Composition	des communautés avifaunistiques	70
Distribution	spatiales.....	71
Tendances	72
Annexe 4	: Composition des communautés avifaunistiques : résultats.....	73
4.1	Composition générale de l'avifaune des deux sites	73
4.2	Compositions bassins par bassins	76
Annexe 5	: Distribution spatiale des différentes espèces de Laro-limicoles présentes sur les salins	81
Annexe 6	: Evolution des populations de Laro-limicoles sur les dernières années	88

Table des figures

Figure 1 : Emplacement des Salins d'Hyères sur le trait de côte méditerranéen français. Les sites des Salins d'Hyères au sein de la Communauté d'Agglomération Toulon Provence Méditerranée.	13
Figure 2: Emprise du parc national de Port-Cros.	14
Figure 3: Zonage pour les comptages ornithologiques. En bleu, les bassins retenus pour l'étude.	22
Figure 4: Localisation des points de suivi physico-chimiques sur les Vieux Salins.	24
Figure 5: Localisation des points de suivi physico-chimiques sur le salin des Pesquiers.	25
Figure 6 : Schéma du modèle statistique, avec ses trois grandes dimensions (gestion, structure spatio-temporelle).	27
Figure 7: Graphes de fit du modèle espèce par espèce.	32
Figure 8: Valeurs estimées de l'attractivité des Vieux Salins (en nombre d'oiseaux par bassin par rapport à la moyenne des Pesquiers).	34
Figure 9 : Cartes des attractivités estimées des différents bassins pour chaque espèce (en nombre d'individus par rapport à la moyenne des Pesquiers).	37
Figure 10 : Effets de la hauteur d'eau sur les espèces étudiées (en nombre d'oiseaux par centimètre d'eau) sur les Vieux Salins (VS) et salin des Pesquiers (P).	38
Figure 11: Effets de la salinité sur les espèces étudiées (en nombre d'oiseaux par g/l) sur les Vieux Salins (VS) et salin des Pesquiers (P).	39
Figure 12: Effets de la concentration en oxygène dissous sur les espèces étudiées (en nombre d'oiseaux par mg/L) sur les Vieux Salins (VS) et salin des Pesquiers (P).	40
Figure 13: Effet du niveau d'eau (en cm) sur l'abondance relative des Laro-limicoles du salin des Pesquiers (en rouge) et Vieux Salins (en bleu). Les intervalles de crédibilité à 95% sont représentés.	45
Figure 14 : Effet de la salinité (en g/L) sur l'abondance relative des Laro-limicoles du salin des Pesquiers (en rouge) et des Vieux Salins (en bleu). Les intervalles de crédibilité à 95% sont représentés.	49
Figure 15: Effet de la concentration en oxygène dissous (en mg/L) sur l'abondance relative des Laro-limicoles du salin des Pesquiers (en rouge) et des Vieux Salins (en bleu).	53
Figure 16: Exemple de représentation de la surface en eau du bassin à main levée.	59
Figure 17: Composition moyenne de l'avifaune du salin des Pesquiers mois par mois.	74
Figure 18 : Composition moyenne de l'avifaune du salin des Pesquiers mois par mois.	75
Figure 19: Composition des communautés avifaunistiques bassin par bassin sur le salin des Pesquiers en été.	77
Figure 20 : Composition des communautés avifaunistiques bassin par bassin sur le salin des Pesquiers en hiver.	78
Figure 21: Composition des communautés avifaunistiques bassin par bassin sur les Vieux Salins en été.	79
Figure 22: Composition des communautés avifaunistiques bassin par bassin sur les Vieux Salins en hiver.	80
Figure 23: Répartition des différentes espèces des salins.	87
Figure 24 : Tendances estimées pour les effectifs de Laro-limicoles entre 2009 et 2016 sur le salin des Pesquiers (en rouge) et Vieux Salins (en bleu).	93
Figure 25: tendances des effectifs de Laro-limicoles sur la période 2009-2016 sur le salin des Pesquiers.	94
Figure 26: tendances des effectifs de Laro-limicoles sur la période 2009-2016 sur le salin des Pesquiers.	94

Figure 27 : tendances des effectifs de Laro-limicoles sur la période 2009-2012 sur le salin des Pesquiers	95
Figure 28 : tendances des effectifs de Laro-limicoles sur la période 2009-2012 sur les Vieux Salins..	95
Figure 29 : tendances des effectifs de Laro-limicoles sur la période 2013-2016 sur le salin des Pesquiers	96
Figure 30 : tendances des effectifs de Laro-limicoles sur la période 2013-2016 sur le salin des Pesquiers	96
Tableau 1 : Table des espèces étudiées avec leur période de présence sur les salins.	16
Tableau 2 : Informations quantitatives relatives aux comptages.	23
Tableau 3 : Tableau des contacts	67
Tableau 4: tableau des R-hat pour les différents paramètres du modèle	68

1. Contexte et objectifs de l'étude

1.1 Contexte global

Les zones humides littorales abritent les écosystèmes les plus riches et productifs de la planète (Millennium Ecosystem Assessment Program, 2005). Ces espaces naturels rendent des services écosystémiques vitaux aux sociétés humaines : purification de l'eau, prévention des inondations, régulation des événements climatiques extrêmes etc. (UICN Water 2015, Constanza *et al.*, 1997). Elles jouent un rôle critique dans la conservation de la biodiversité. A l'interface de milieux instables, les zones humides côtières servent en particulier de zones de reproduction et de halte migratoire pour l'avifaune (Birdlife, 2017).

Ces milieux sont toutefois fragiles et menacés : 64% ont disparu de la surface de la Terre au 20^{ème} siècle (Groupe d'évaluation scientifique et technique Ramsar, 2015). Face à la menace d'une utilisation destructrice des zones humides relictuelles, des outils internationaux ont ainsi été mis en place. C'est le cas de la Convention relative aux zones humides d'importance internationale particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau, ou Convention de Ramsar qui engage 168 pays à appliquer une gestion hydraulique raisonnée dans l'intérêt de la conservation de l'avifaune et des milieux naturels aquatiques. Ces objectifs sont partagés par des organisations mondiales telles que Birdlife International, Wetlands International ou l'initiative WetMed pour la conservation des zones humides à l'échelle du bassin méditerranéen. L'implémentation de la convention est assurée par des réglementations européennes (Directive Cadre sur l'Eau, Directives Oiseaux et Habitats), nationales (Code de l'environnement) ou locales (réglementations spécifiques aux Réserves Naturelles, Parcs nationaux et propriétés du Conservatoire de l'Espace Littoral et des Rivages Lacustres) qui fixent les objectifs de conservation.

L'essentiel des zones humides préservées dans les pays développés et urbanisés est directement ou indirectement gérée par l'homme (canalisation des cours d'eau, gestion hydraulique pour les exploitations agricoles et les industries, plans d'eau artificiels pour la prévention des crues ou la production d'électricité). Ce contrôle partiel des zones humides littorales est une opportunité pour la conservation car il permet potentiellement de maintenir des conditions écologiques favorables pour la biodiversité. La mise en place de plans de gestions raisonnés s'avère en effet fructueuse, comme en témoigne l'augmentation des populations des espèces de zones humides observée dans les zones Ramsar (Groupe d'évaluation scientifique et technique Ramsar, 2015).

A travers la complémentarité des ressources qu'ils exploitent, les oiseaux aquatiques, en particulier le cortège des Laro-limicoles, sont des indicateurs de l'état de conservation des zones humides littorales (Birdlife, 2017). Ils sont par conséquent la cible prioritaire des programmes de conservation (Convention de Ramsar, Directive Oiseaux).

L'étude des effets de la gestion hydraulique des zones humides côtières sur l'avifaune s'inscrit donc dans le cadre d'un enjeu mondial autour des zones humides et de la biodiversité qu'elles abritent.

1.2 Présentation du site des salins d'Hyères

1.2.1 Aspects géographiques, économiques et statut de conservation

Les Salins d'Hyères sont composés de deux sites : le salin des Pesquiers (550 hectares) et les Vieux Salins (350 hectares). Ils sont les reliques d'un vaste delta côtier ayant façonné le littoral méditerranéen en un double tombolo qui s'avance dans la mer Méditerranée sur près de 6 kilomètres (Fig. 1). Ces deux cordons de sable enserrant les étangs des Pesquiers entre les formations rocheuses de Giens et celles de l'Ouest de la Corniche des Maures constituent ainsi le point le plus méridional du trait de côte continental Européen sur 600km entre l'Aude et la Toscane.

Cette formation géomorphologique unique a été exploitée dès l'Antiquité pour son emplacement stratégique (comptoirs commerciaux), puis au Moyen Age pour ses ressources, dont le sel (Malatric, 1964). Aujourd'hui, les salins s'inscrivent au sein d'une communauté d'agglomération de 420 000 habitants dans un contexte péri-urbain dense économiquement lié au tourisme balnéaire (Communauté d'Agglomération de Toulon Provence Méditerranée: TPM, 2017).

Le réservoir de biodiversité constitué par les salins est reconnu zone humide d'intérêt international au titre de la convention RAMSAR depuis 2008 (Gimond-Lanteri et Corbobesse, 2008), inscrit aux inventaires ZNIEFF et classé au sein du réseau de sites Natura 2000 (DIREN PACA, 2007). Il se situe intégralement sur le territoire de la commune d'Hyères-les-Palmiers, dans l'aire d'adhésion du Parc national de Port Cros (Fig.2).

Le salin des Pesquiers et les Vieux Salins sont distants de cinq kilomètres à vol d'oiseau. Le salin des Pesquiers, en plein cœur de la presqu'île de Giens, est directement entouré par la mer et la pression urbaine : un aéroport, un port de plaisance, un parc d'attraction, une zone industrielle et commerciale et des plages fortement fréquentées sont présentes à moins de 500m du site. Les Vieux salins, au Nord-Est de la commune d'Hyères-les-Palmiers, se situent en périphérie mais sont également soumis à la pression urbaine (réseau routier, lotissements, camping).

Les salins se caractérisent ainsi par une situation unique qui leur permet d'assurer un rôle de zone refuge pour la biodiversité sur un littoral Méditerranéen fortement urbanisé.

1.2.2 Mode de gestion

Les deux sites relèvent de la propriété du Conservatoire de l'Espace Littoral et des Rivages Lacustres (CELRL) depuis 2001 et sont gérés par la Communauté d'Agglomération Toulon Provence Méditerranée (CA TPM) avec l'appui technique et scientifique du Parc national de Port-Cros (PNPC). Si la production de sel a pris fin en 1995, le réseau hydraulique est toujours entretenu pour la gestion du site. Les niveaux d'eau sont régulés quotidiennement dans l'intérêt de la conservation des paysages et de la biodiversité, dont l'avifaune aquatique inféodée aux zones humides méditerranéennes (Conservatoire du Littoral, 2015). Si le salin des Pesquiers est inaccessible au public en dehors de visites guidées, un parcours de découverte permet un accès partiel aux Vieux Salins. Ceux-ci hébergent notamment la maison des Salins qui valorise le patrimoine naturel et culturel du site. Les pressions associées à la fréquentation des sites diffèrent donc entre les deux salins.



FIGURE 1 : EN HAUT, EMBLEMMENT DES SALINS D'HYERES SUR LE TRAIT DE COTE MEDITERRANEEEN FRANÇAIS. EN BAS, LES SITES DES SALINS D'HYERES AU SEIN DE LA COMMUNAUTE D'AGGLOMERATION TOULON PROVENCE MEDITERRANEE. ADAPTE DE : WWW.GEOPORTAIL.GOUV.FR.

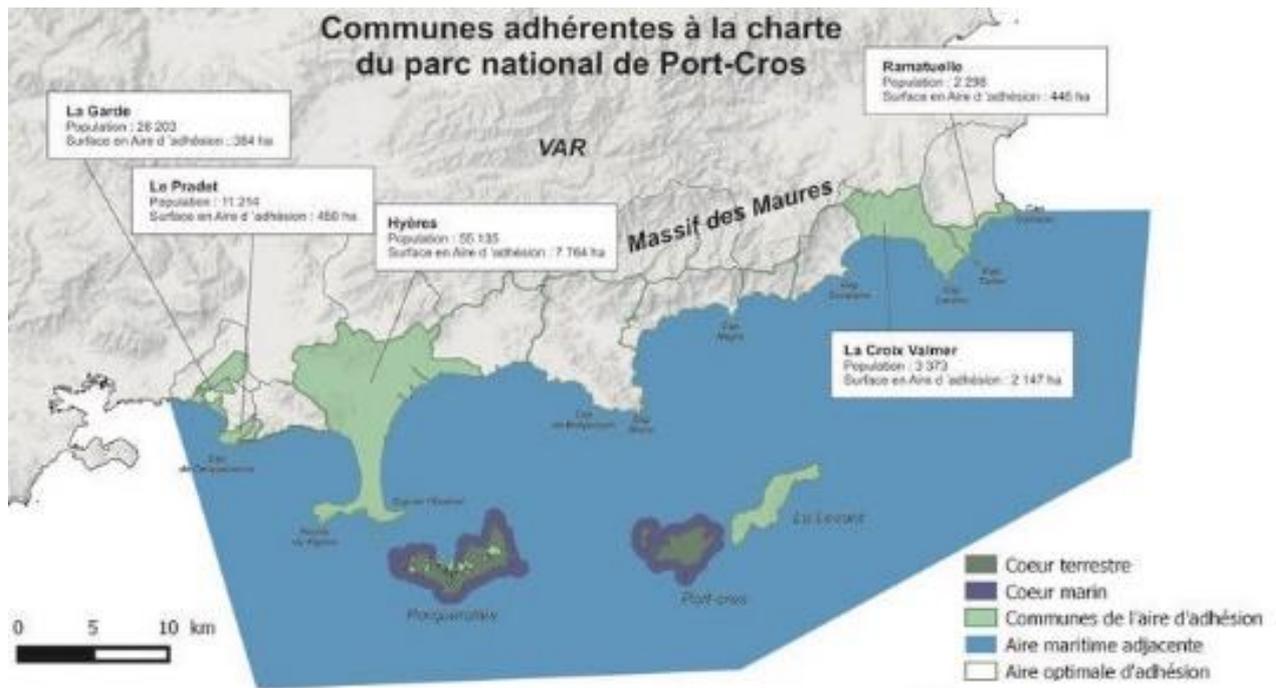


FIGURE 2: EMPRISE DU PARC NATIONAL DE PORT-CROS. SOURCE : PNPC.



PLANCHE 1 : VUE SUR LE BASSIN 4, AU CŒUR DES VIEUX SALINS. AU PREMIER PLAN, CANAUX ET « CANON » EN BOIS, PERMETTANT LA GESTION HYDRAULIQUE DU SITE. AU CENTRE, ECHELLE DE MESURE POUR LES RELEVÉS PHYSICO-CHIMIQUES.

1.2.3 Enjeux du site

Les salins bénéficient d'une situation géographique stratégique, puisqu'il s'agit de la plus grande zone humide entre la Camargue et le delta du Pô sur la côte Méditerranéenne, et de l'un des seuls sites favorables aux Laro-limicoles sur ce linéaire côtier fortement urbanisé. L'emplacement du salin des Pesquiers sur la presqu'île de Giens, véritable reposoir naturel formé par l'avancée du continent dans la Méditerranée, est particulièrement propice aux haltes migratoires des Laro-limicoles qui migrent le long du trait de côte.

Constitués d'une mosaïque de 36 habitats, dont 14 sont reconnus d'intérêt communautaire, le site accueille régulièrement 218 espèces d'oiseaux, dont 15 espèces rares ou menacées à l'échelle nationale ou communautaire (Lascève *et al.*, 2006, Rocamora et Yeatman-Berthelot, 1999). C'est ainsi l'un des principaux sites français pour l'hivernage du Gravelot à collier interrompu ou du Flamant rose (jusqu'à 1300 individus, soit 1% de la population européenne). Les salins abritent 38 espèces de végétaux d'intérêt patrimonial, dont 10 sont protégées sur le plan national.

Les espèces d'oiseaux à enjeux sont suivies dans le cadre de divers programmes collaboratifs : suivi de la reproduction, programmes de baguage (Tour du Valat, Association des amis du marais du Vigueirat etc.).



PLANCHE 2 : BAGUAGE D'UN POUSSIN D'AVOCETTE ELEGANTE SUR LE SALIN DES PESQUIERS. SOURCE : STANISLAS WROZA.



PLANCHE 3 : BAGUAGE D'UN POUSSIN DE GRAVELOT A COLLIER INTERROMPU SUR LE SALIN DES PESQUIERS. SOURCE : STANISLAS WROZA.

1.3 Contexte du stage

1.3.1 Objectifs du plan de gestion

Les principales finalités du plan de gestion des salins actuellement mis en place par le CELRL et la CA TPM sont (Conservatoire du littoral, 2015) :

- Le maintien et le développement de la valeur écologique et biologique des milieux aquatiques.
- La préservation des milieux terrestres ainsi que de la faune et de la flore associée à ces habitats.

- Le développement d'un suivi scientifique du patrimoine naturel (ornithologique, piscicole, etc.).
- La valorisation (historique et biologique) du site pour tous les publics (grand public et monde scientifique).

Dans ce contexte d'une reconversion de l'ancien site industriel des salins d'Hyères en un site naturel à forte valeur biologique, la CA TPM et le PNPC souhaitent connaître l'impact des modalités de gestion sur l'avifaune. Une telle étude requiert au préalable la collecte de données ornithologiques et physico-chimiques sur plusieurs années, et n'a donc pas pu être menée plus tôt. Les résultats doivent en particulier servir de support pour l'élaboration du nouveau plan de gestion mis en œuvre à partir de 2018 (PNPC et CEFE, 2017).

La gestion hydraulique artificielle conduite au quotidien par le gestionnaire nécessite la mobilisation de moyens conséquents pour la fiabilisation des infrastructures hydrauliques et le fonctionnement des pompes coûteuses, d'où la recherche d'une certaine efficacité et l'intérêt d'une évaluation des actions engagées. .

1.3.2 Enjeux en terme de conservation

Le site des salins d'Hyères abrite des populations nicheuses de Laro-limicoles d'ampleur régionale voire nationale (Tab. 1). Certaines espèces, comme le Gravelot à collier interrompu, sont en déclin à l'échelle Européenne (Life + ENVOLL, 2012). En période de migration, les nicheurs locaux sont rejoints par des oiseaux scandinaves et issus des populations de la côte Atlantique (LPO PACA, 2015). Ces espèces sont étroitement liées aux modalités de gestion des Salins (Dias, 2009). Le maintien par la gestion hydraulique d'un espace favorable aux Laro-limicoles revêt donc un intérêt qui dépasse largement la conservation de l'avifaune locale.

Espèce	Nom latin	Période de présence		Nombre de couples nicheurs
		Du :	Au :	
Avocette élégante	<i>Recurvirostra avosetta</i>	01/04	01/07	300
Echasse blanche	<i>Himantopus himantopus</i>	07/04	15/08	55
Flamant rose	<i>Phoenicopterus roseus</i>	01/01	31/12	700 oiseaux non nicheurs
Goéland railleur	<i>Chroicocephalus genei</i>	01/04	01/08	250
Gravelot à collier interrompu	<i>Charadrius alexandrinus</i>	01/01	31/12	20
Mouette rieuse	<i>Chroicocephalus ridibundus</i>	01/01	31/12	40
Sterne caugek	<i>Thalasseus sandvicensis</i>	01/01	31/12	30
Sterne naine	<i>Sternula albifrons</i>	01/05	01/07	60
Sterne pierregarin	<i>Sterna hirundo</i>	15/04	15/08	60

TABEAU 1 : TABLE DES ESPÈCES ETUDIÉES AVEC LEUR PÉRIODE DE PRÉSENCE SUR LES SALINS.

1.4 Les Laro-limicoles

1.4.1 Intérêt de la population d'étude

Les Laro-limicoles constituent un cortège d'espèces d'oiseaux fortement dépendantes toute l'année des milieux aquatiques où elles trouvent couvert, sécurité, repos et sites de nidification. Ces groupes sont menacés par la pression forte exercée par l'homme sur les milieux côtiers : urbanisation, fréquentation touristique intense, pollution des eaux, disparition des lagunes côtières, montée des eaux (Colwell, 2010 ; Galbraith *et al.*, 2001). La majorité des espèces sont protégées au titre de la Convention de Berne (Conseil de l'Europe, 1982) et de la Directive Oiseaux (Parlement européen, 2009) et font l'objet de programmes d'études internationaux (International Wader Study Group, 2017). Ces espèces sont inscrites dans les objectifs du plan de gestion du site.

1.4.2 Caractéristiques écologique des Laro-limicoles

Le terme « Laro-limicoles » est couramment utilisé pour désigner deux grandes familles d'oiseaux distinctes d'un point de vue phylogénétique et morphologique mais fréquentant des habitats similaires :

- les Laridés (Goélands et Mouettes), auxquels on associe les Sternidés (Sternes et Guifettes) par commodité.

Ces espèces sont fortement associées aux milieux aquatiques, et sont majoritairement piscivores ou omnivores. Elles nichent en général sur des îlots (ou falaises), en bordure de plans d'eau dont la profondeur est suffisante pour empêcher le passage des prédateurs (Larsson et Olsen, 2010). 19 espèces ont été notées sur les salins d'Hyères, dont 6 se reproduisent ou estivent sur place (LPO PACA, 2015) : les Sternes pierregarin, naine et caugek, la Mouette rieuse, le Goéland leucophaée et le Goéland railleur (Tab.1).

- les Limicoles (Echasse blanche, Avocette élégante, Gravelots, Bécasseaux, Chevaliers par exemple).

Cette grande famille regroupe des oiseaux dont les caractéristiques morphologiques sont variées, mais combinent souvent un long bec et/ou de longues pattes. En Méditerranée, les limicoles sont tous associés au littoral et milieux lagunaires adjacents et se nourrissent d'invertébrés (mollusques dont les Bivalves, crustacés dont *Artemia salina*) inféodés aux milieux inondés (Chandler, 2010). La plupart des espèces sont capables de migrer sur de longues distances et ont une courte période de reproduction. Dès la fin de l'été, les populations locales sont rejointes par des oiseaux du Nord de l'Europe et ce sont ainsi plus de 10 000 oiseaux pour une quarantaine d'espèces qui transitent chaque année sur les Salins d'Hyères. Trois espèces nichent actuellement sur place : L'Avocette élégante, l'Echasse blanche et le Gravelot à collier interrompu (LPO PACA, 2015). Le Chevalier gambette et l'Huîtrier pie ont niché ou tenté de nicher dans le passé.

En plus des Laro-limicoles, nous avons intégré le Flamant rose à notre modèle d'étude, au regard de l'enjeu européen du site pour l'espèce au titre de la convention RAMSAR. Pour certaines analyses préliminaires (incluant la caractérisation de l'avifaune des salins), d'autres espèces inféodées aux milieux aquatiques ont pu être considérées (hérons, canards...).

1.4.3 Utilisation des deux sites par les Laro-limicoles

Sur la période étudiée (2013-2016), les Laro-limicoles ont tous niché sur le salin des Pesquiers, tandis que les Vieux Salins ont été utilisés de façon plus privilégiée comme sites d'alimentation et de repos (Tab.1). La Sterne naine a toutefois niché sur ce dernier site en 2017. D'autres espèces comme l'Echasse blanche s'y sont également reproduites par le passé (LPO PACA, 2015).



PLANCHE 4: EN HAUT, GOELAND RAILLEUR. EN BAS, AVOCETTE ELEGANTE. SOURCE : STANISLAS WROZA.

1.5 Un double enjeu gestion/recherche fondamentale

1.5.1 Objectifs du stage pour les gestionnaires

Au terme de plusieurs années de collecte de données, le PNPC et la CA TPM ont souhaité faire appel au monde de la recherche afin de comprendre l'impact des modalités de gestion sur la biodiversité locale. L'équipe Biogéographie et Ecologie des Vertébrés (BEV) du Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive (CEFE), reconnue pour ses travaux sur l'écologie des oiseaux, a été choisie pour ce partenariat sous la forme du présent stage. Les objectifs sont les suivants :

Comprendre comment la gestion hydraulique influence l'abondance en oiseaux sur chacun des deux sites (Salin des Pesquiers et Vieux Salins).

Les variations spatiales et temporelles de l'abondance sont étudiées sur une période de trois ans pour l'ensemble des bassins. La gestion hydraulique est caractérisée par trois paramètres modulables :

- le niveau d'eau,
- la salinité,
- la concentration en oxygène.

Les espèces retenues pour l'étude sont les espèces nicheuses inscrites dans les objectifs du plan de gestion :

- Avocette élégante (*Recurvirostra avosetta*),
- Echasse blanche (*Himantopus himantopus*),
- Flamant rose (*Phoenicopterus roseus*),
- Goéland railleur (*Chroicocephalus genei*),
- Gravelot à collier interrompu (*Charadrius alexandrinus*),
- Mouette rieuse (*Chroicocephalus ridibundus*),
- Sterne caugek (*Thalasseus sandvicensis*),
- Sterne naine (*Sternula albifrons*),
- Sterne pierregarin (*Sterna hirundo*).

1.5.2 Intérêt scientifique du stage

Le territoire du Parc national a pour vocation « de servir d'espace de travail à la recherche et d'accueillir des équipes de chercheurs de façon à contribuer à l'acquisition de connaissances fondamentales aussi bien qu'appliquées » (PNPC, 2013). Les grandes orientations données par la stratégie scientifique du parc sont développées au moyen d'appels à propositions, à l'origine de la présente collaboration avec le CEFÉ. L'objectif de ce stage est donc également de faire valoir l'intérêt scientifique et fondamental du travail accompli, en plus de l'intérêt pour le gestionnaire.

Sur tout le littoral méditerranéen, les salins – exploités ou non - concentrent l'essentiel des populations de Laro-limicoles nichant ou transitant par le Sud de l'Europe (Life+ ENVOLL, 2012) : Salin de Giraud et Salins d'Aigues-Mortes en Camargue, Ancien salins de Lansargues dans l'Hérault, Salins de Gruissan dans l'Aude ou Salins d'Hyères dans le Var. La préservation de ces habitats artificiels a été mise en évidence comme facteur clé pour la conservation des Limicoles (Masero, 2003). Ces environnements instables sont pourtant associés à de forts taux d'échec de reproduction (Béchet *et al.*, 2009). Ils se caractérisent par des conditions physico-chimiques extrêmes : le stress salin, associé à la fluctuation des niveaux d'eau, entrave la croissance du couvert végétal (Munns, 2002), ce qui expose les nids aux prédateurs aériens, mais rend également ceux-ci plus aisément repérables par les espèces coloniales (Botton, 1984). La circulation des engins d'exploitation occasionne des perturbations régulières (Madeiros *et al.*, 2007) et les fluctuations rapides des niveaux d'eau engendrent un taux d'échec des nidifications particulièrement élevé (Rocha et Ramos, 2016). Ces zones littorales plates, sensibles à la montée des eaux, sont affectées rapidement par le changement climatique (Saintilan et Rogers, 2015). A ce titre, les salins apparaissent donc comme des habitats sub-optimaux, voire des pièges.

Des différences de composition avifaunistique ont été mises en évidence entre les bassins d'évaporation et les zones inondées de façon permanente dans les salins (Birtsas *et al.*, 2011), ainsi qu'entre les salins et lagunes naturelles (Rowell-Garvon et Shannon, 2009). Cependant, les paramètres physico-chimiques déterminant l'attractivité de ces sites pour les Laro-limicoles n'ont jamais été étudiés, faute de données.

Notre objectif a été de mettre en évidence les facteurs environnementaux favorisant l'installation d'une forte diversité avifaunistique dans les conditions extrêmes des salins. Il s'agit en particulier de savoir si les oiseaux sont attirés par les caractéristiques physico-chimiques propres aux salins (salinité, niveau d'eau..), ou s'ils se rabattent sur ces habitats sub-optimaux car les milieux naturels côtiers favorables n'existent plus (assèchement des zones humides, bétonisation du littoral etc.). Nous avons pour cela caractérisé la réponse de neuf espèces nicheuses sur les Salins d'Hyères à trois paramètres physico-chimiques découlant directement de la gestion hydraulique du site.

Nous testons l'hypothèse selon laquelle l'attractivité des salins pour les Laro-limicoles ne provient pas de leurs propriétés physico-chimiques, mais des habitats relictuels qui leurs sont associés au sein d'un littoral méditerranéen fortement urbanisé et drainé. Si notre hypothèse est soutenue, nous nous attendons à trouver une réponse négative de la majorité des espèces à la salinité.

2. Matériels et méthodes

2.1 Données exploitées

2.1.1 Comptages ornithologiques

Un suivi ornithologique du site est assuré de façon standardisée par la Ligue pour la Protection des Oiseaux délégation Provence Alpes Côte d'Azur (LPO PACA) depuis 2002 et commandité par la CA TPM depuis 2005. Les Laro-limicoles sont comptés par décade entre octobre et avril, et de façon hebdomadaire au cours de la saison de reproduction d'avril à septembre (TPM, 2016). Au cours du comptage, toutes les espèces présentes sur les bassins, qu'elles soient au repos ou en nourrissage, sont identifiées et dénombrées par bassin (Fig. 3). Le comptage s'effectue aux jumelles, ou à l'aide d'une longue vue montée sur une rotule pour vitre de voiture pour les oiseaux les plus lointains.

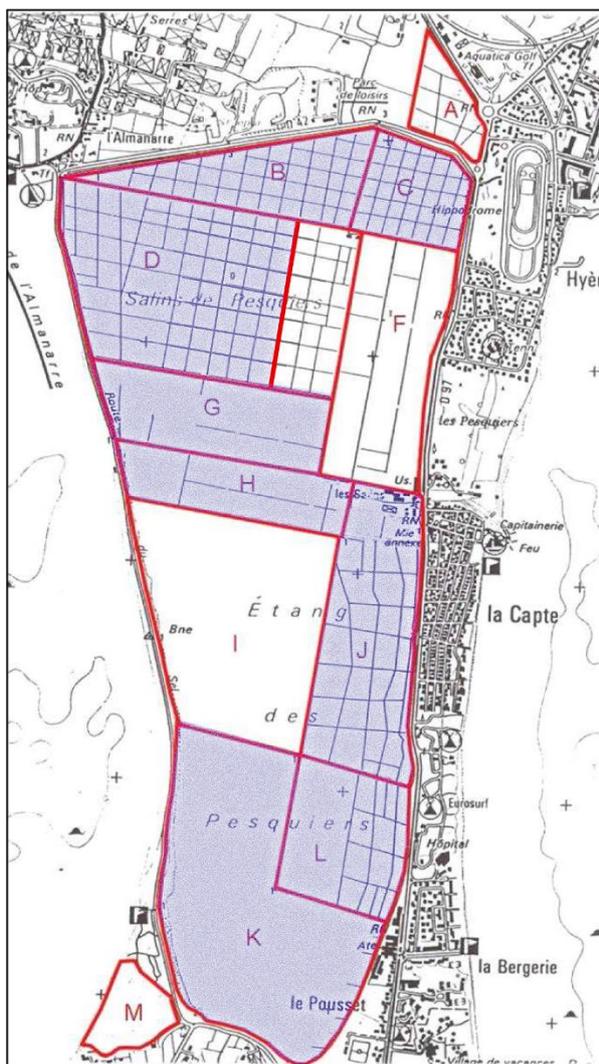
Afin de limiter les dérangements occasionnés par le comptage (envol des oiseaux à l'approche d'une silhouette humaine), ces derniers sont effectués depuis un véhicule. Chaque bassin étant entouré par une piste praticable, la totalité du site est accessible. Les bassins sont toujours prospectés dans le même ordre, en suivant un parcours de 77km qui commence au Marais de Redon (salin des Pesquiers) et se termine sur les bassins de la Remise (Vieux Salins). Si le temps de suivi de chaque bassin n'est pas standardisé, le comptage commence au lever du jour et dure environ cinq heures. Un à trois bénévoles peuvent assister l'ornithologue pour la saisie des données, qui se fait en temps réel à l'aide de l'application Naturalist (Biolovision, 2017). Le Marais de Redon est compté depuis un point de vue situé à l'extérieur des salins qui permet de visualiser l'ensemble du plan d'eau. Les oiseaux arrivant ou partant d'un bassin au cours du comptage ne sont pas comptabilisés afin de limiter les doubles comptages. En cas de conditions météorologiques défavorables, le comptage est reporté à la date la plus proche offrant de meilleures conditions.

La surface moyenne des bassins est de 33.2ha, avec une couverture végétale inexistante à faible composée essentiellement de salicornes et sansouires plus ou moins denses (Borel, 2012). En termes d'habitats, plus de 90% de la surface du site est classée en « pièce d'eau saumâtre sans végétation » (Noble et Michaud, 2016). Par ailleurs, les Laro-limicoles se nourrissent à découvert sur les vasières ou en eau peu profonde, et nichent sur des îlots faiblement végétalisés. Au regard des faibles distances d'observation, de la détection aisée des Laro-limicoles sur le site et de l'expérience acquise par l'ornithologue en charge des comptages sur les trois années, nous considérons que ceux-ci sont exhaustifs pour les espèces étudiées et que chaque oiseau est correctement identifié.

Sélection des données exploitables :

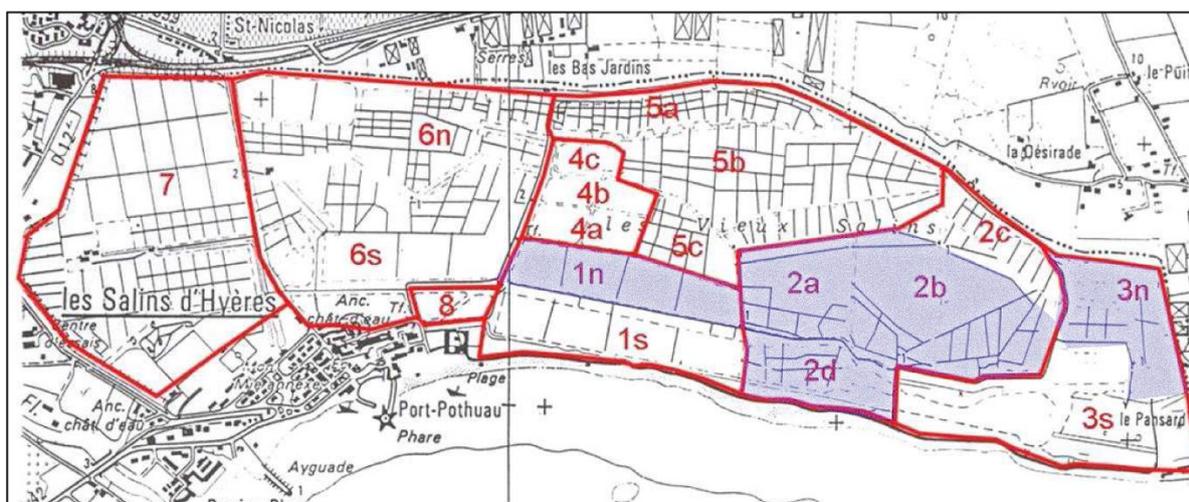
Notre étude a porté uniquement sur les espèces nicheuses, affectées de façon plus durable par la gestion hydraulique du site. Neuf espèces sont ainsi ciblées par le plan de gestion du site : ce sont celles que nous avons retenues. Pour chaque espèce, la période d'étude a été restreinte à la période de présence de 95% des effectifs annuels totaux (Tab. 1). Ceci permet de limiter les fausses absences associées à la phénologie des espèces ainsi que d'éliminer les présences d'oiseaux égarés, retardataires ou précurseurs.

Seuls les comptages concernant des bassins où des relevés physico-chimiques sont effectués ont été conservés pour l'étude, sur une période allant du 24 juin 2014 au 26 décembre 2016 (Tab. 2).



Zonation des Salins des Pesquiers

Numéro des bassins	Nom des bassins
A	Marais de Redon
B	Partènements extérieurs Ouest
C	Partènements extérieurs Est
D	Etang neuf
E	Partènements intérieurs Est
F	Tables salantes
G	Vieux bassins
H	Nouveaux bassins
I	Etang Nord
J	Partènements de la Capte
K	Etang Sud
L	Partènements de Giens
1N	Quenet Nord
1S	Quenet Sud
2A	Bassin N°1
2B	Bassin N°2 et 3
2C	La Rode et le Jas
2D	Les Ournèdes
3N	Les Ilotes et Peires
3S	Etang de l'Anglais
4A	Farnosi Sud
4B	Farnosi Nord
4C	Bassin du Grand Conseiller
5A	Les Terrasses
5B	Conseillers - Joncs- Carrés
5C	L'Estagnet
6N	La Mère - Matinières
6S	St Nicolas - Olivâtre
7	La Remise - 7
8	Nourrice - 8



Zonation des Vieux Salins

FIGURE 3: ZONAGE POUR LES COMPTAGES ORNITHOLOGIQUES. EN BLEU, LES BASSINS RETENUS POUR L'ÉTUDE. SOURCE : LPO PACA.

Période d'étude	Du 26/06/2014 au 22/12/2016
Nombre total de comptages	101
Nombre de comptages manquants	0
Nombre de comptages réalisés par Aurélien Audevard	97
Nombre de comptages réalisés par Elise Cougenc	4

TABLEAU 2 : INFORMATIONS QUANTITATIVES RELATIVES AUX COMPTAGES.

2.1.2 Relevés physico-chimiques

La salinité, le niveau d'eau et la concentration en oxygène dissous sont mesurés toutes les deux semaines. Ces relevés sont effectués par le même observateur de façon continue depuis juin 2014 sur 20 points prédéfinis répartis sur l'ensemble des deux sites : 12 sur les Pesquiers et 8 sur les Vieux Salins (Fig. 4 et 5). Les dates de relevés physico-chimiques ne correspondent pas aux dates de comptages ornithologiques. Par conséquent nous avons fait correspondre à chaque comptage les valeurs des paramètres physico-chimiques relevés à la date la plus proche (distante en moyenne de 3±2 jour).

Nous n'avons considéré que les bassins dans lesquels des relevés physico-chimiques sont effectués.

- Le niveau d'eau est lu sur une échelle de mesure implantée de façon permanente au niveau de chaque point de relevé. Il est mesuré en cm. Cette valeur ne correspond pas forcément à la hauteur d'eau réelle en tout point du bassin : un bassin peut être à sec sur sa partie Sud, et couvert de 5cm d'eau sur sa partie Nord. La précision de la mesure est d'un centimètre.
- La salinité est mesurée (en g/L) à l'aide d'une sonde dont le seuil de saturation est de 120g/L. Au-delà de cette valeur, un densimètre mécanique doit être utilisé pour déterminer la salinité. Dans 14% des cas, le densimètre n'a pas été utilisé et la valeur réelle n'était donc pas accessible. Par conséquent nous avons tronqué toutes les valeurs de salinités supérieures à 120g/L. L'étude porte donc exclusivement sur la gamme des salinités comprises entre 0 et 120g/L. La précision de la mesure est de l'ordre du gramme par litre.
- La concentration en oxygène est mesurée en mg/L à l'aide d'une sonde. Sa précision est de l'ordre du dixième de milligramme par litre.

Le jeu de données contient 2% de valeurs manquantes (points de mesure inaccessibles certains jours, opérations de travaux d'entretien). Nous simulons ces valeurs manquantes à partir de la distribution du jeu de données observées.

Synthèse sur les données :

Deux jeux de données collectés indépendamment sont utilisés : les comptages ornithologiques sont analysés à la lumière des relevés physico-chimiques (salinité, niveau d'eau, concentration en oxygène dissous). Ceci nous contraint en particulier à restreindre l'étude aux dates et bassins pour lesquels les deux types de données ont été collectés. Par ailleurs, nous ne considérons que les espèces nicheuses en dehors de leurs périodes de migration. Nous supposons que la totalité des oiseaux présents sur site est effectivement observée et correctement identifiée à chaque comptage.

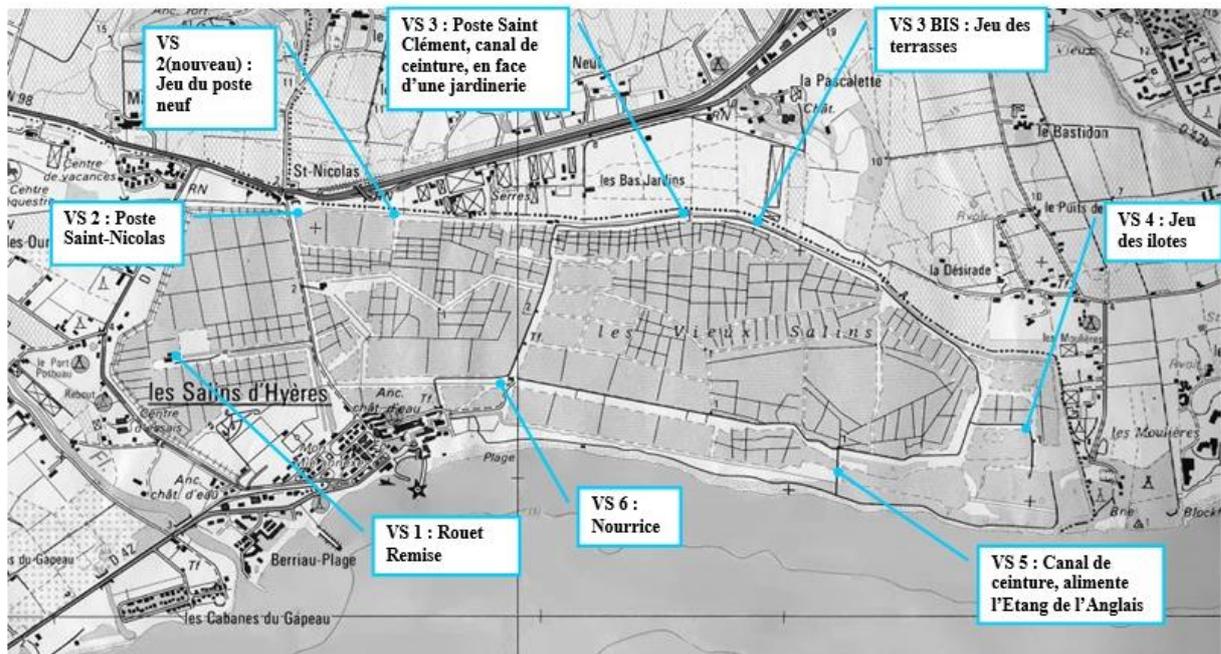


FIGURE 4: LOCALISATION DES POINTS DE SUIVI PHYSICO-CHIMIQUES SUR LES VIEUX SALINS. SOURCE : TPM

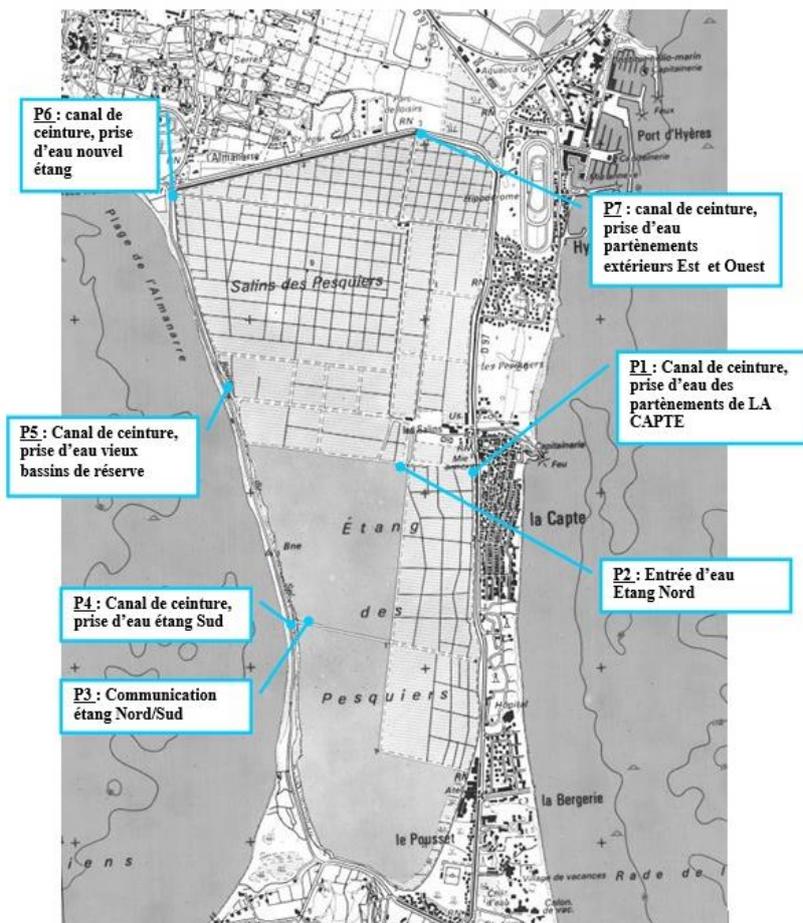


FIGURE 5: LOCALISATION DES POINTS DE SUIVI PHYSICO-CHIMIQUES SUR LE SALIN DES PESQUIERS. SOURCE : TPM

2.2 Méthodes : Effets des pratiques de gestion sur les espèces clé

2.2.1 Principe du modèle

Nous faisons l'hypothèse que l'abondance des Laro-limicoles sur les salins est structurée par trois types de facteurs (Fig.6) :

- Les paramètres physico-chimiques (hauteur d'eau, salinité, concentration en oxygène dissous), sur lesquels le gestionnaire possède un levier d'action et dont nous cherchons à évaluer l'effet.
- Des caractéristiques écologiques propres à chaque bassin, constantes dans le temps, et qui rendent les bassins plus ou moins attractifs (hauteur des digues, présence ou non d'îlots dans la zone inondable, zone de présence du sanglier).
- Le temps, sous la forme d'une autocorrélation temporelle à l'échelle intra ou interannuelle (Zuur *et al.*, 2009 ; Olea, 2009). L'abondance d'une espèce donnée à un comptage t à l'année k sur un bassin donné est en effet dépendante :
 - Du succès reproductif à l'année précédente $k-1$, qui influe sur le nombre d'oiseaux susceptibles de revenir sur le site l'année suivante.
 - Du nombre d'oiseaux comptés à la date $t-1$: certains groupes sont cantonnés sur un site même si les conditions environnementales évoluent. C'est le cas par exemple lorsqu'un nid fixe les oiseaux sur un site donné, ou lorsque l'on est en présence d'oiseaux migrateurs, plus nombreux au pic de migration.

La réponse moyenne des oiseaux aux variables de gestion est présumée différente entre les espèces. Nous supposons également que la réponse de chaque espèce peut différer entre les Vieux Salins et les salin des Pesquiers au regard des différences écologiques et avifaunistiques discutées précédemment.

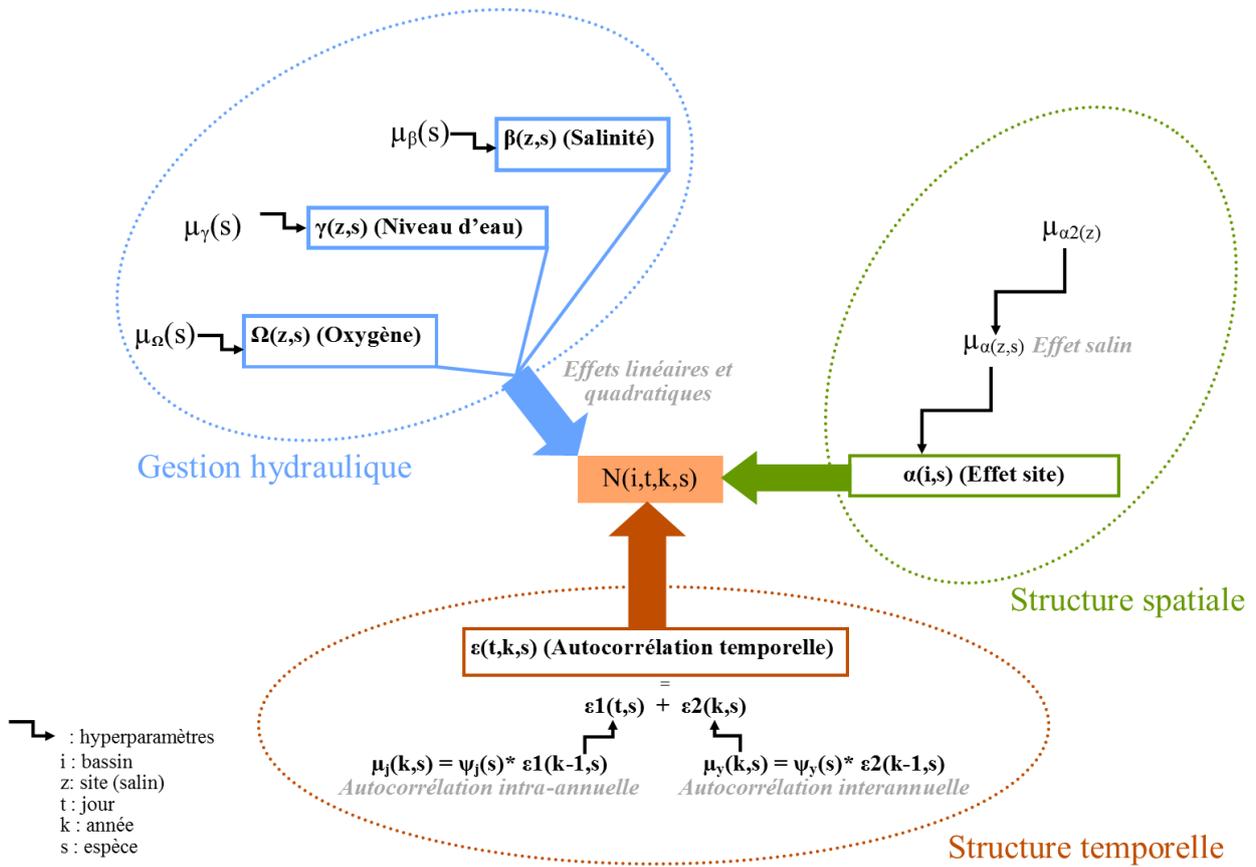


FIGURE 6 : SCHEMA DU MODELE STATISTIQUE, AVEC SES TROIS COMPOSANTES (GESTION, STRUCTURE SPATIO-TEMPORELLE). L'EFFET SITE EST STRUCTURE PAR SALIN. L'AUTOCORRELATION TEMPORELLE SE DECOMPOSE EN UNE AUTOCORRELATION INTRA-ANNUELLE (ENTRE LES COMPTAGES) ET INTERANNUELLE (ENTRE LES SAISONS DE REPRODUCTION).

2.2.2 Structure mathématique du modèle

Nous avons adopté un modèle hiérarchique autorégressif afin de relier les valeurs d'abondances spécifiques aux valeurs des paramètres de gestion. La base de ce modèle est similaire aux modèles hiérarchiques en abondance de Kéry et Royle (2015).

Modélisation de l'abondance

Le comptage des oiseaux est modélisé par un processus de Poisson. L'effectif de l'espèce s observé sur le bassin i , au comptage t de l'année k suit une loi de Poisson d'espérance $\lambda_{i,t,k,s}$:

$$N_{i,t,k,s} \sim \text{Poisson}(\lambda_{i,t,k,s}) \quad (1)$$

L'espérance de ce processus est reliée aux covariables physico-chimiques par un lien log, avec un intercept $\alpha_{i,s}$ variant par bassin :

$$\log(\lambda_{i,t,k,s}) <- \alpha_{i,s} + \gamma_{\text{salin}(i),s} \times \text{NIV}_{i,t,k} + \beta_{\text{salin}(i),s} \times \text{SEL}_{i,t,k} + \omega_{\text{salin}(i),s} \times \text{OXY}_{i,t,k} + \gamma_2_{\text{salin}(i),s} \times \text{NIV}_{i,t,k}^2 + \beta_2_{\text{salin}(i),s} \times \text{SEL}_{i,t,k}^2 + \omega_2_{\text{salin}(i),s} \times \text{OXY}_{i,t,k}^2 + \varepsilon_{t,k,s} \quad (2)$$

où les paramètres $\gamma_{\text{salin}(i),s}$, $\beta_{\text{salin}(i),s}$ et $\omega_{\text{salin}(i),s}$ correspondent aux pentes des réponses respectives au niveau d'eau, à la salinité et à la concentration en oxygène dissous, pour l'espèce s sur le bassin i . Le terme *salin(i)* désigne le salin (Pesquiers ou Vieux Salins) dans lequel le bassin i est situé. La variable $\varepsilon_{t,k,s}$ correspond à l'effet aléatoire latent, avec une structure d'autocorrélation temporelle qui sera explicitée par la suite.

Effets quadratiques

La plupart des espèces de Laro-limicoles se spécialisent dans l'exploitation des ressources alimentaires dans une gamme de profondeur d'eau ciblée (Norazlimi et Ramli, 2015; Helmers, 1992). Les espèces que nous étudions sont ainsi inféodées aux milieux semi-inondés ou aux plans d'eau intermédiaires et ne se retrouvent ni en milieu aride, ni en pleine mer ou lac profond (Chandler, 2009; Larsson et Olsen, 2010). De même, ces oiseaux sont habituellement observés dans des valeurs intermédiaires de salinité et des milieux médians en termes d'oxygénation (Chandler, 2009). Nous supposons ainsi qu'il peut exister une valeur optimale, au-delà et en deçà de laquelle les conditions écologiques deviennent défavorables pour les Laro-limicoles, ce qui ne peut être pris en compte par un modèle linéaire.

. A ces fins nous utilisons un deuxième modèle, dit quadratique, dans lequel nous faisons l'hypothèse d'un effet quadratique sur les covariables physico-chimiques. Ceci se traduit par l'ajout de termes quadratiques dans l'équation (2) :

$$\log(\lambda_{i,t,k,s}) <- \alpha_{i,s} + \gamma_{\text{salin}(i),s} \times \text{NIV}_{i,t,k} + \beta_{\text{salin}(i),s} \times \text{SEL}_{i,t,k} + \omega_{\text{salin}(i),s} \times \text{OXY}_{i,t,k} + \gamma_2_{\text{salin}(i),s} \times \text{NIV}_{i,t,k}^2 + \beta_2_{\text{salin}(i),s} \times \text{SEL}_{i,t,k}^2 + \omega_2_{\text{salin}(i),s} \times \text{OXY}_{i,t,k}^2 + \varepsilon_{t,k,s} \quad (2\text{bis})$$

Modélisation des covariables

Les valeurs manquantes de chaque paramètre sont supposées suivre une loi Normale centrée sur la valeur moyenne observée, et d'écart type l'écart type observé. Afin d'éviter l'apparition statistique de valeurs aberrantes des paramètres (exemple : niveau d'eau négatif), nous contraignons ces valeurs à la gamme des valeurs réelles observées. Par exemple, pour le niveau d'eau, la covariable est modélisée par :

$$NIV_{i,t,k} \sim \text{Normal}(\text{mean}(Niv_{obs}), \text{sd}(Niv_{obs})) \in I(\min(Niv_{obs}), \max(Niv_{obs})) \quad (3)$$

Où NIV_{obs} correspond aux valeurs observées du niveau d'eau.

Dans le cas particulier de la salinité, la valeur maximale observée est fixée à 120g/L, pour les raisons de troncation précédemment évoquées.

$$\max(\text{Sel}_{obs})=120\text{g/L} \quad (4)$$

Structure de l'effet site

Chaque bassin présente ses propres spécificités, constantes dans le temps, et rendant les bassins plus ou moins attractifs pour une espèce donnée (hauteur des digues, présence ou non d'îlots dans la zone inondable, végétation spécifique...), ce que nous appelons « effet site ». C'est l'effet du site i sur l'abondance de l'espèce s , indépendamment des pratiques de gestion.

L'effet site s'exprime à deux niveaux :

- Effet salin : c'est la différence d'attractivité entre le salin des Pesquiers et les Vieux Salins, notamment pour les espèces qui nichent sur les Pesquiers mais pas sur les Vieux Salins.
- Effet bassin : au sein de chaque site (Pesquiers ou Vieux Salins), c'est la différence d'attractivité entre les bassins.

L'effet bassin est donc structuré par un hyperparamètre : l'effet salin, suivant la structure suivante (Kéry et Royle, 2009) :

$$\alpha_{i,s} \sim \text{Normal}(\mu_{\text{salin}(i),s}, \tau) \quad (5)$$

où $\mu_{\text{salin}(i),s}$ correspond à l'attractivité moyenne du salin $\text{salin}(i)$ pour l'espèce s . Afin que les paramètres soient identifiables, nous fixons $\mu_{\text{Pesquiers},s} = 0$.

Structure du terme autorégressif

Notre modèle présente la spécificité de combiner deux échelles temporelles :

- Un pas de temps annuel : l'abondance d'une espèce donnée sur un bassin donné dépend du succès reproductif à l'année précédente,
- Un pas de temps hebdomadaire : le nombre d'oiseaux présents sur un bassin au comptage t dépend du nombre d'oiseaux qui y ont été dénombrés au comptage $t-1$ (groupes cantonnés, présence d'un nid qui fixe les oiseaux sur un site même si les conditions physico-chimiques varient).

Cette structure nous impose ainsi la prise en compte de deux formes d'autocorrélations temporelles, que nous avons traitées de façon additive :

En reprenant la notation $\varepsilon_{t,k,s}$, l'effet aléatoire latent de l'équation (3) devient :

$$\varepsilon_{t,k,s} = \varepsilon_{1,t,s} + \varepsilon_{2,k,s} \quad (6)$$

Où ϵ_1 et ϵ_2 représentent respectivement les autocorrélations intra et interannuelles.

L'autocorrélation est supposée d'ordre 1 (Zuur 2009) :

$$\epsilon_{1,t,s} \sim \text{Normal}(\mu_{1,t,s}, \tau_1) \quad (7)$$

$$\mu_{1,t,s} = \psi_{1s} \times \epsilon_{1,t-1,s} \quad (8)$$

et

$$\epsilon_{2,k,s} \sim \text{Normal}(\mu_{2,k,s}, \tau_2) \quad (9)$$

$$\mu_{2,k,s} = \psi_{2s} \times \epsilon_{2,k-1,s} \quad (10)$$

Où les termes ψ_{1s} et ψ_{2s} sont des inconnues qui déterminent l'intensité des autocorrélations intra et interannuelles pour l'espèce s .

A priori (priors)

Nous spécifions des *priors* non informatifs pour tous les paramètres (à l'exception des covariables NIV, SEL et OXY discutées précédemment). Ainsi, pour le niveau d'eau, par exemple :

$$Y_{\text{salin}(i),s} \sim \text{Normal}(\mu_{\gamma_s}, \tau_s)$$

Evaluation du modèle

La convergence des différents paramètres a été estimée à l'aide de la statistique de convergence de Gelman et Rubin (R-hat, Gelman et Rubin, 1993 ; Gelman *et al.*, 2002). Ces indicateurs statistiques nous permettent de contrôler la convergence de façon quantitative. On considère que la convergence a bien lieu lorsque la valeur du R-hat est inférieure à 1.1.

La pertinence du modèle est vérifiée à l'aide d'un contrôle prédictif bayésien *a posteriori* (bayesian posterior predictive check, Gelman et Hill, 2007). Ce test consiste à simuler les abondances des différentes espèces prédites par le modèle à partir des données physico-chimiques observées. Nous comparons les abondances simulées par le modèle à partir des valeurs de covariables observées aux abondances réellement observées.

Evaluation du modèle

Le modèle a été rédigé à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2016), puis implémenté sous le programme JAGS (Plummer, 2003), sur 3 chaînes de Markov Monte Carlo de deux millions d'itérations chacune, avec un burn in d'un million d'itérations.

Le script R est donné en Annexe 7.

2.2.3 Utilisation de deux modèles : linéaire et quadratique

Pour quantifier les réponses des espèces aux pratiques de gestion, nous avons utilisé deux modèles :

- Le modèle présenté précédemment, que nous appelons modèle quadratique,
- Le même modèle sans les termes quadratiques, que nous appelons modèle linéaire.

Ces deux modèles n'ont pas été comparés. Sauf précision contraire, les résultats présentés réfèrent au modèle quadratique.

Résumé simplifié du modèle statistique implémenté :

L'objectif de notre modèle est d'estimer les effets de trois facteurs explicatifs de l'abondance en oiseaux sur chacun des salins (variables physico-chimiques associées à la gestion, effets sites et autocorrélation temporelle) afin de distinguer les effets imputables aux pratiques de gestion des effets liés à d'autres paramètres environnementaux. Ces trois facteurs sont explicitement spécifiés dans notre modèle (Fig. 6).

Les réponses au niveau d'eau, à la salinité et à la concentration en oxygène dissous varient par espèce et par site (Pesquiers ou Vieux Salins). Afin de modéliser l'effet de ces variables de gestion de façon réaliste au regard de l'écologie des espèces, nous avons inclus des termes quadratiques dans le modèle. Ceux-ci permettent d'obtenir d'éventuelles valeurs optimales pour les paramètres de gestion.

Le modèle inclut un effet site, qui rend compte du fait que certains bassins sont plus attractifs que d'autres pour une espèce donnée, indépendamment des pratiques de gestion, même si l'on ne connaît pas forcément les causes de ces différences. Cet effet bassin se superpose à un effet salin : les Vieux Salins et les salins de Pesquiers ne sont pas aussi attractifs l'un que l'autre pour les Laro-limicoles (situation géographique, îlots de nidification...).

Enfin, les oiseaux ne choisissent pas librement leur bassin à chaque comptage, mais peuvent être cantonnés au même endroit plusieurs semaines d'affilée par contrainte (exemple : présence d'un nid, pic de migration). Deux comptages successifs ne sont pas indépendants et deux saisons de reproduction successives ne sont pas indépendantes. Notre modèle corrige ce biais induit par la phénologie des espèces sur la base d'une autocorrélation intra et interannuelle

3. Résultats : effets des pratiques de gestion sur les espèces

3.1. Validité du modèle

Les valeurs des R-hat, présentées en Annexe 2 indiquent que tous les paramètres ont convergé correctement et sont donc interprétables. La correspondance entre valeurs réelles et valeurs prédites est bonne (Fig.7), et nous considérons donc que notre modèle est capable de répliquer correctement les données observées, sauf aux très faibles et très grandes valeurs de comptages (*i.e.* lorsqu'il y a plusieurs centaines d'oiseaux, et lorsqu'il y a un ou aucun oiseau). Les résultats seront donc surtout valides en dehors de ces situations extrêmes (bassins désertés ou gros rassemblements d'oiseaux ponctuels), qui représentent environ 15% des données.

La réplcation des données est la meilleure pour le Gravelot à collier interrompu et les Sternidés, tandis que les plus grands écarts à la réalité surviennent aux valeurs extrêmes chez la Mouette rieuse.

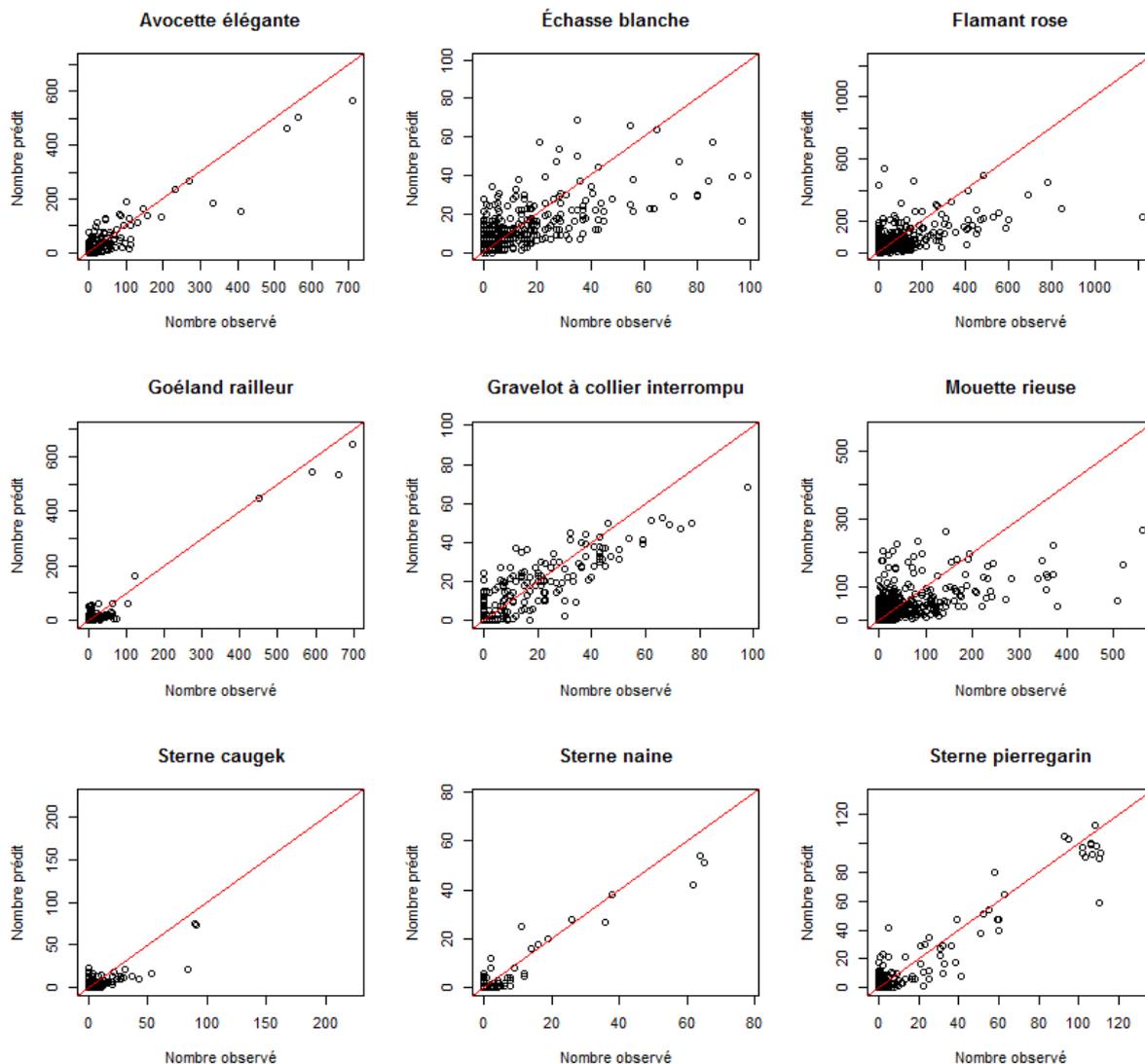


FIGURE 7: GRAPHES DE REALISME DU MODELE ESPECE PAR ESPECE.

3.2 Effet site

3.2 Différence entre les Pesquiers et les Vieux Salins

L'effet site est un indice relatif, qui permet de comparer le nombre d'oiseaux entre sites si les hauteurs d'eau, salinités et concentrations en oxygène dissous étaient identiques partout.

Les Vieux Salins s'avèrent moins attractifs (ou au mieux également attractifs) pour toutes les espèces considérées (Fig. 8). Cet effet site est du même ordre de grandeur pour toutes les espèces. En effet, pour chaque espèce, il y a entre un et onze oiseaux de moins par bassin sur les Vieux Salins que sur les Pesquiers, à conditions physico-chimiques égales par ailleurs.

Seuls le Goéland railleur, la Sterne naine et le Gravelot à collier interrompu ne présentent pas une préférence tranchée pour le salin des Pesquiers.



PLANCHE 4 : POUSSIN DE STERNE PIERREGARIN SUR UN ILOT FLOTTANT, BASSIN J, SALIN DES PESQUIERS. LA PRESENCE D'UN ILOT FLOTTANT CONTRIBUE PROBABLEMENT A L'EFFET SITE POSITIF DE CE BASSIN POUR LA STERNE PIERREGARIN.

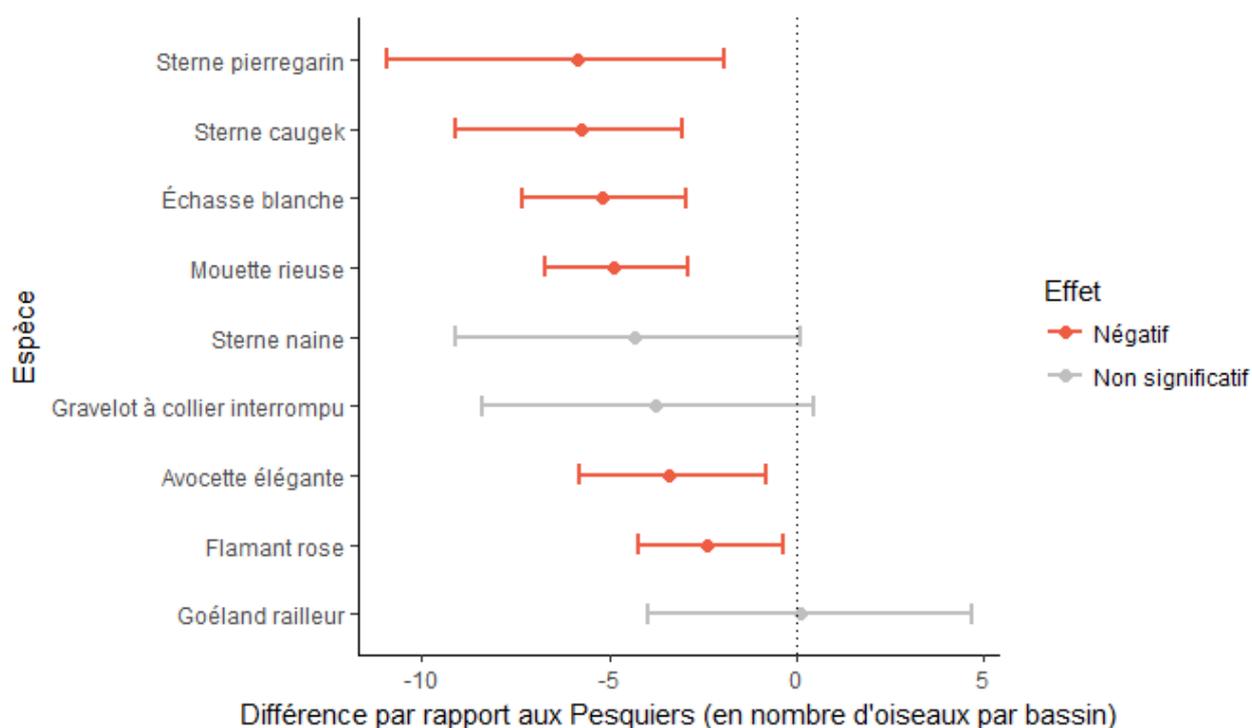


FIGURE 8: VALEURS ESTIMÉES DE L'EFFET SITE $A_{i,s}$ PAR ESPÈCE SUR LES VIEUX SALINS (EN NOMBRE D'OISEAUX PAR BASSIN PAR RAPPORT À LA MOYENNE DES PESQUIERS) AVEC LEURS INTERVALLES DE CREDIBILITE A 95%.

3.2.2 Différence entre les bassins

Sur le même principe que l'effet site, l'effet bassin est un indice relatif, qui permet de comparer le nombre d'oiseaux entre bassins si les hauteurs d'eau, salinités et concentrations en oxygène dissous étaient identiques partout. Plus cet effet est élevé, plus il y a d'oiseaux.

Une dichotomie apparaît entre le Sud des Pesquiers, très attractif, et les Vieux Salins, dépréciés par la plupart des oiseaux (Fig.9) :

- La moitié Sud du salin des Pesquiers (Bassins G, H, J, K et L : Vieux et Nouveaux Bassins, partènements de la Capte, Etang Sud et partènements de Giens) s'avère attractive pour toutes les espèces.
- A l'inverse, les bassins 1 et 3 des Vieux Salins (Quenet, Ilotes et Peires, Etang des Anglais) sont toujours moins peuplés. Le reste des Vieux Salins (bassins 2A à 2D) n'est quant à lui favorable qu'au Gravelot à collier interrompu et au Goéland railleur.

L'attractivité de la moitié Nord du salin des Pesquiers pour les 9 espèces étudiées est plus contrastée. Cette zone est appréciée par toutes les espèces sauf le Gravelot à collier interrompu ou les Sternes naines et pierregarins. Les partènements extérieurs (bassins B et C) présentent quant à eux un faible potentiel pour l'Avocette élégante, le Goéland railleur ou le Flamant rose, mais attirent l'Echasse blanche et la Mouette rieuse. Pour les Laridés, la préférence marquée est pour les bassins profonds à îlots (bassins J, K, L) et les réservoirs (bassins H, D, 2A).

Attractivité des bassins pour le Goéland railleur (indépendamment de la gestion hydraulique)

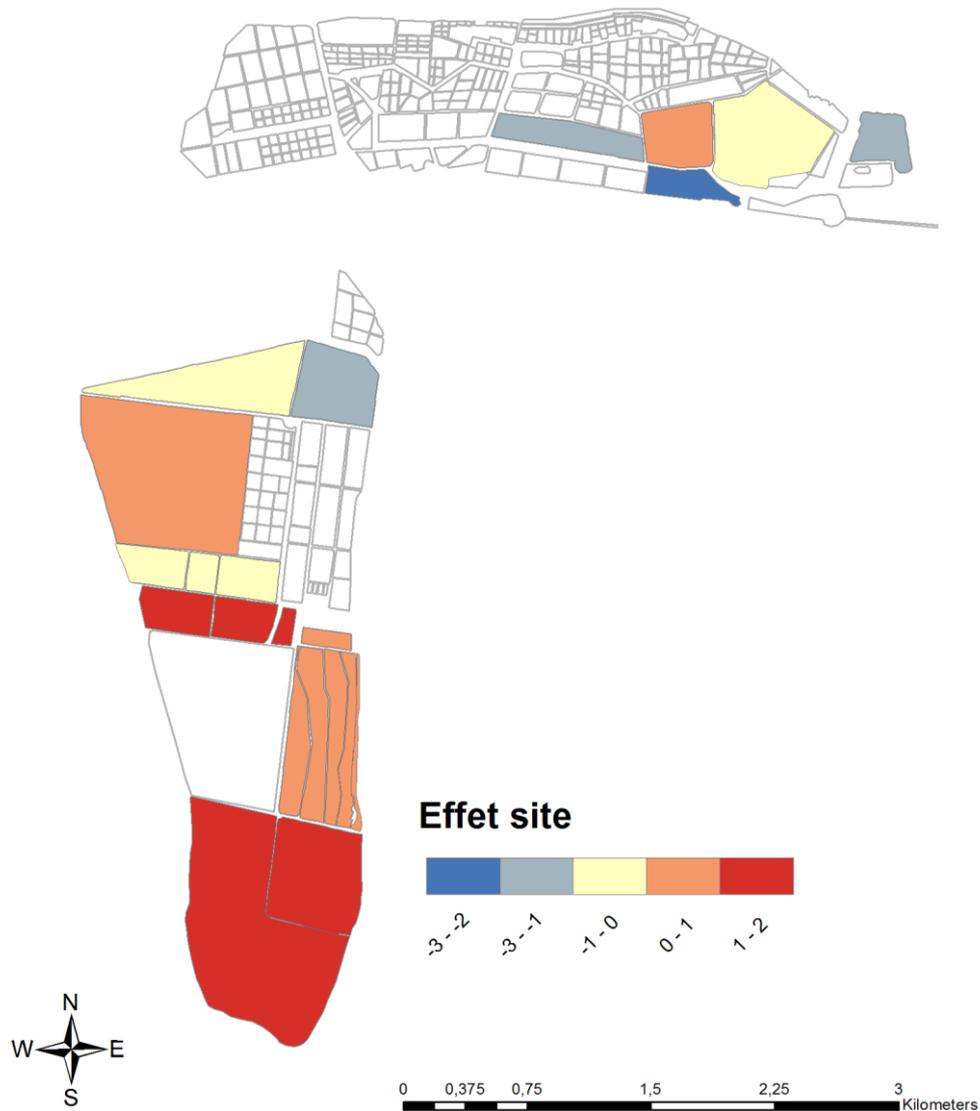
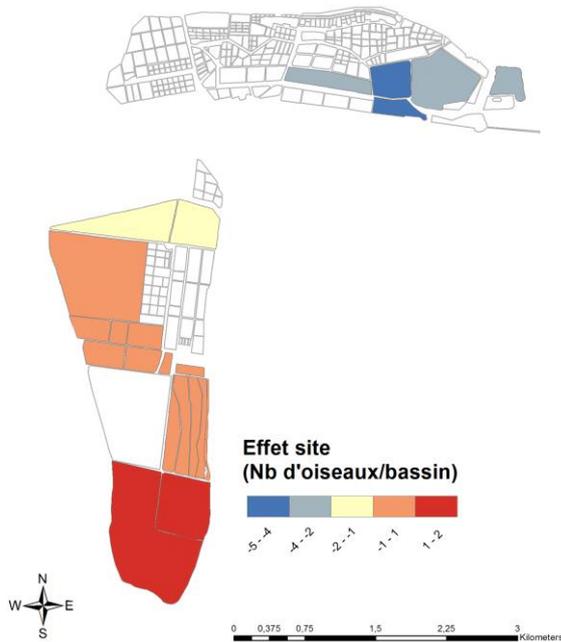
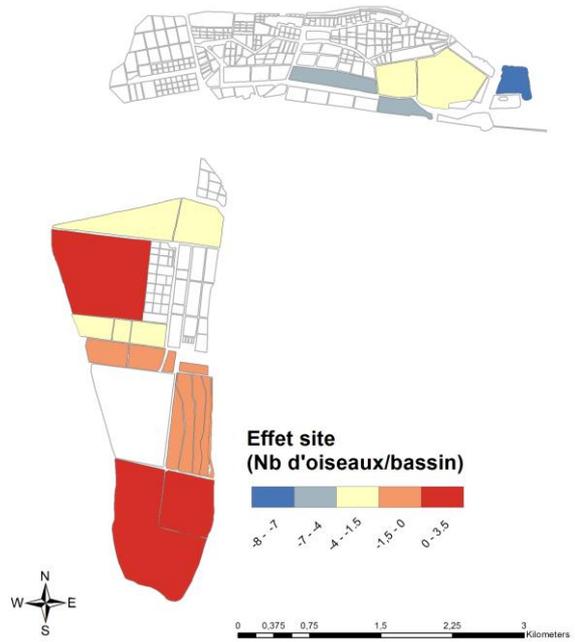


Figure 9 : Cartes des effets bassins pour chaque espèce (en nombre d'individus par rapport à la moyenne des Pesquiers). En bleu les 40% des bassins les moins attractifs et en rouge les 40% des bassins les plus attractifs.

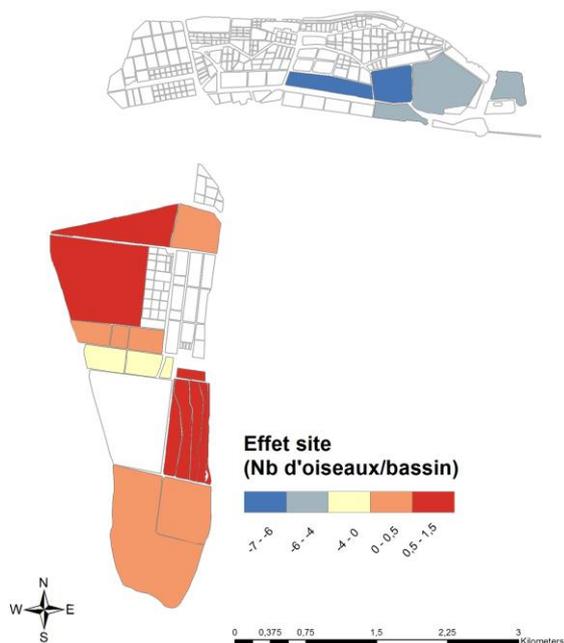
**Attractivité des bassins pour l'Avocette élégante
(indépendamment de la gestion hydraulique)**



**Attractivité des bassins pour le Flamant rose
(indépendamment de la gestion hydraulique)**



**Attractivité des bassins pour l'Echasse blanche
(indépendamment de la gestion hydraulique)**



**Attractivité des bassins pour le
Gravelot à collier interrompu
(indépendamment de la gestion hydraulique)**

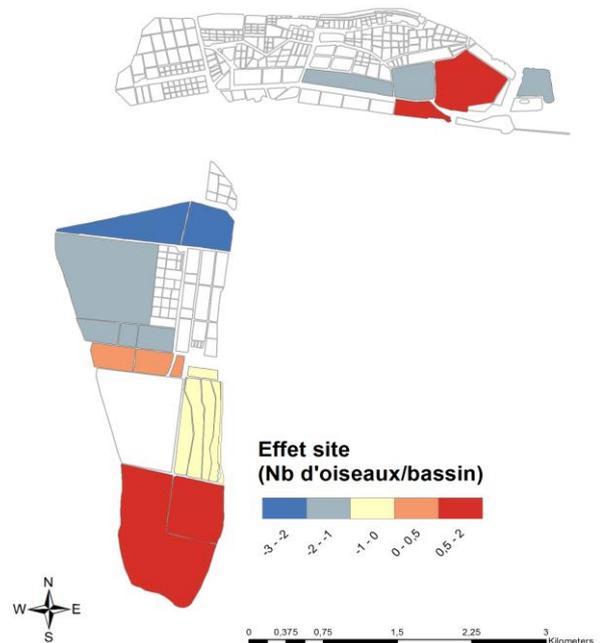
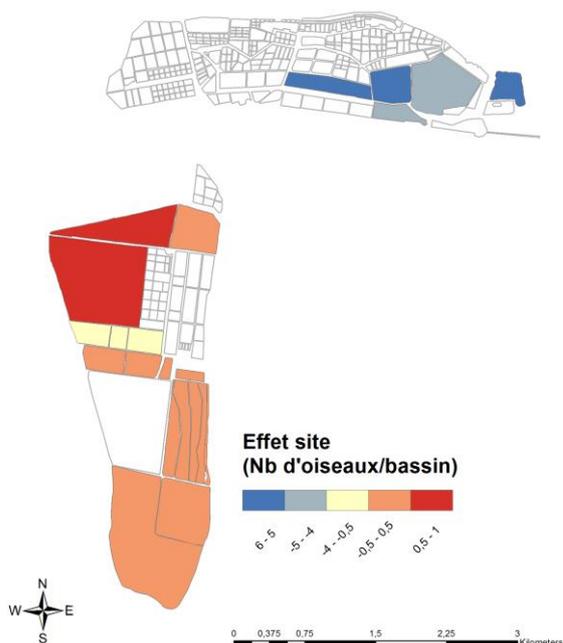
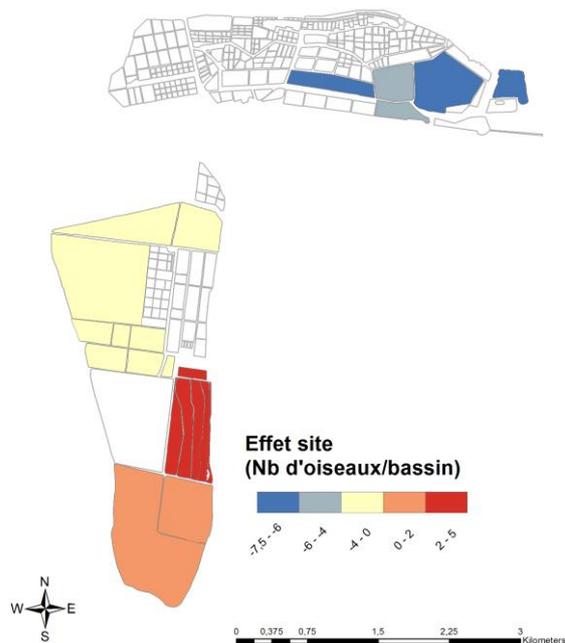


Figure 9 : Cartes des effets bassins pour chaque espèce (en nombre d'individus par rapport à la moyenne des Pesquiers). En bleu les 40% des bassins les moins attractifs et en rouge les 40% des bassins les plus attractifs.

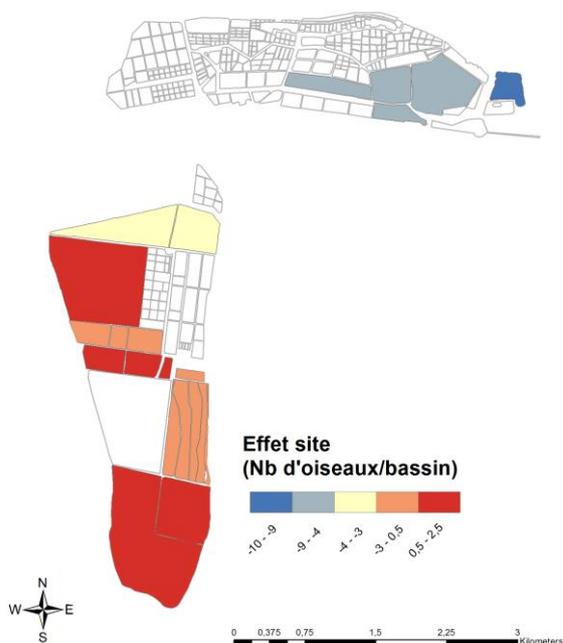
**Attractivité des bassins pour la Mouette rieuse
(indépendamment de la gestion hydraulique)**



**Attractivité des bassins pour la Sterne pierregarin
(indépendamment de la gestion hydraulique)**



**Attractivité des bassins pour la Sterne caugek
(indépendamment de la gestion hydraulique)**



**Attractivité des bassins pour la Sterne naine
(indépendamment de la gestion hydraulique)**

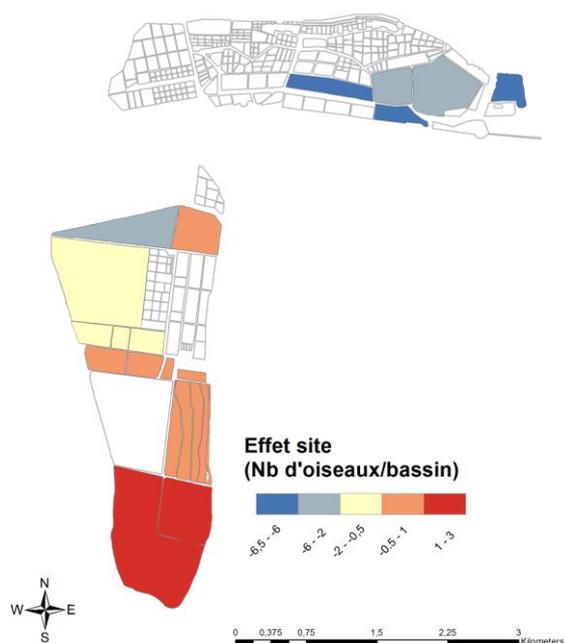


FIGURE 9 : CARTES DES EFFETS BASSINS POUR CHAQUE ESPECE (EN NOMBRE D'INDIVIDUS PAR RAPPORT A LA MOYENNE DES PESQUIERS). EN BLEU LES 40% DES BASSINS LES MOINS ATTRACTIFS ET EN ROUGE LES 40% DES BASSINS LES PLUS ATTRACTIFS.

3.3 Réponses linéaires des espèces aux variables de gestion

Les résultats décrits dans ce paragraphe sont issus du modèle linéaire (2). Ils donnent une indication de l'effet des variations d'un paramètre sur le nombre d'individus, espèce par espèce. Pour cette raison, nous avons choisi de les présenter dans ce rapport. Les résultats des modèles linéaire et quadratique ne reflètent toutefois que deux facettes d'un même résultat.

3.3.1 Niveau d'eau

Les espèces piscivores (Sternes, Mouette) et les grands échassiers (Flamant rose) recherchent les plus grandes hauteurs d'eau, tandis que les plus petits limicoles (Avocette élégante, Échasse blanche et Gravelot à collier interrompu) se concentrent dans les eaux moins profondes (Fig.10). Ainsi, à salinité et concentration en oxygène constantes, les abondances de Sternes pierregarins augmentent de 0.7 (± 0.1) individu par bassin lorsque le niveau d'eau augmente d'un centimètre sur le salin des Pesquiers. A l'inverse, le nombre d'Avocettes élégantes diminue alors de 1.2 (± 0.3) oiseaux par bassin dans ces mêmes conditions.

Le Goéland railleur se caractérise par des réponses opposées sur les deux salins : ses effectifs augmentent de 1.5 (± 0.4) individus par centimètre d'eau supplémentaire sur les Vieux Salins, sites d'alimentation, et diminuent de 0.7 (± 0.3) oiseau par centimètre d'eau additionnel sur les Pesquiers, sites de reproduction et de repos pour l'espèce.

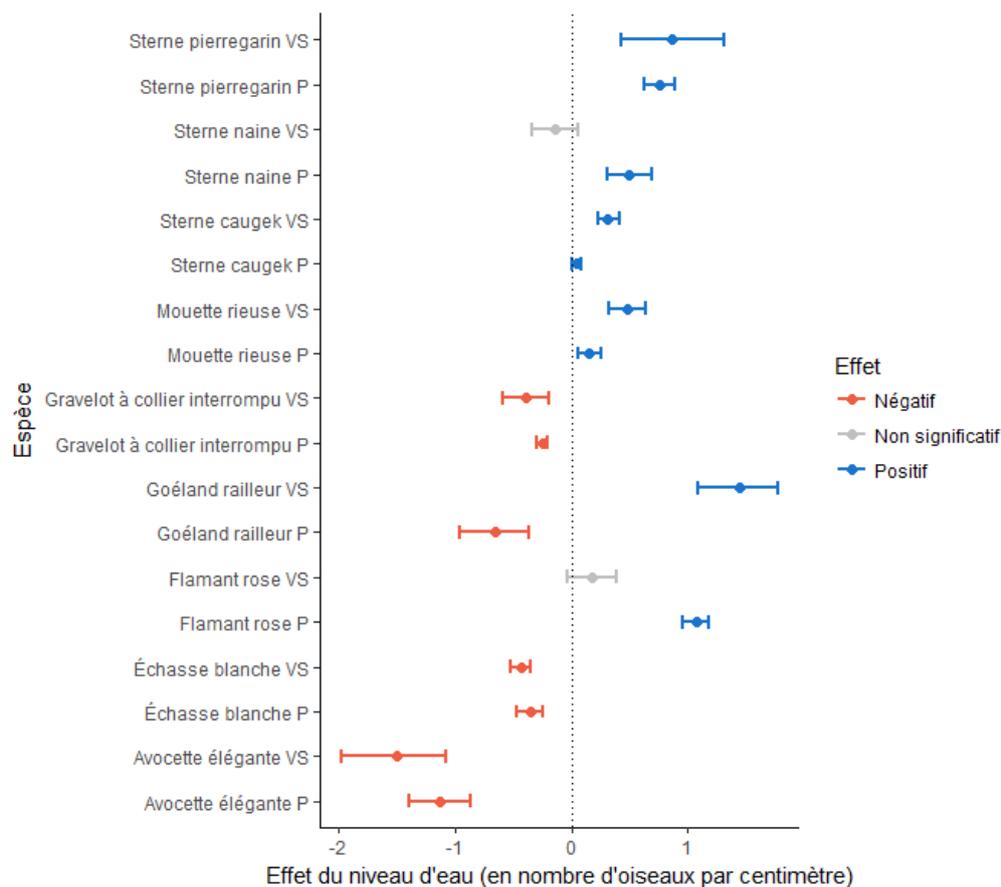


FIGURE 10 : EFFETS DE LA HAUTEUR D'EAU SUR LES ESPECES ETUDIEES (EN NOMBRE D'OISEAUX PAR CENTIMETRE D'EAU) SUR LES VIEUX SALINS (VS) ET SALIN DES PESQUIERS (P).

3.3.2 Salinité

L'effet de la salinité est globalement négatif (Fig. 11). Seules les Sternes pierregarin profitent d'une augmentation de la salinité : l'effectif augmente de 0.4 (± 0.1) individu par gramme de sel sur les Vieux Salins. Les réponses de l'Avocette élégante et du Goéland railleur sont opposées sur les Vieux Salins et le salin des Pesquiers. Ainsi les effectifs augmentent respectivement de 0.1 (± 0.1) et 0.3 (± 0.2) individu par gramme de sel et par bassin sur les Vieux Salins, tandis qu'ils diminuent de 0.4 (± 0.1) et 1(± 0.1) individu par gramme de sel et par bassin sur le salin des Pesquiers.

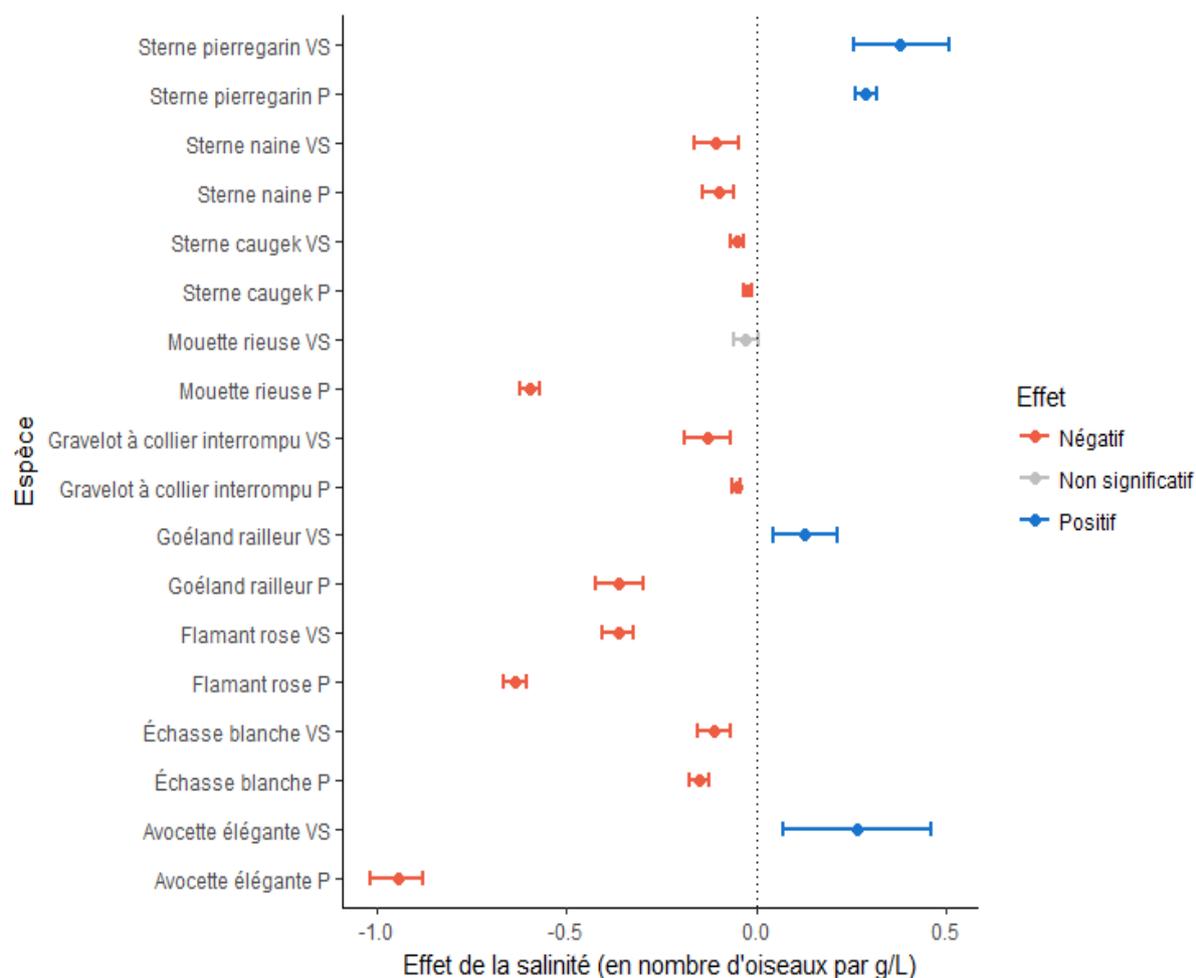


FIGURE 11: EFFETS DE LA SALINITE SUR LES ESPECES ETUDIEES (EN NOMBRE D'OISEAUX PAR G/L) SUR LES VIEUX SALINS (VS) ET SALIN DES PESQUIERS (P).

3.3.3 Concentration en oxygène dissous

L'effet d'une augmentation de la concentration en oxygène dissous est négatif (ou neutre) pour toutes les espèces sur le salin des Pesquiers (Fig. 12). L'effet est particulièrement marqué pour l'Avocette élégante avec une baisse de 10 (± 1.5) individus par milligramme d'oxygène dissous par bassin sur les Vieux Salins. La modification de ce paramètre produit des effets opposés entre les deux sites (positifs sur les Vieux salins et négatifs sur les Pesquiers) pour la Mouette rieuse, le Goéland railleur et l'Échasse blanche.

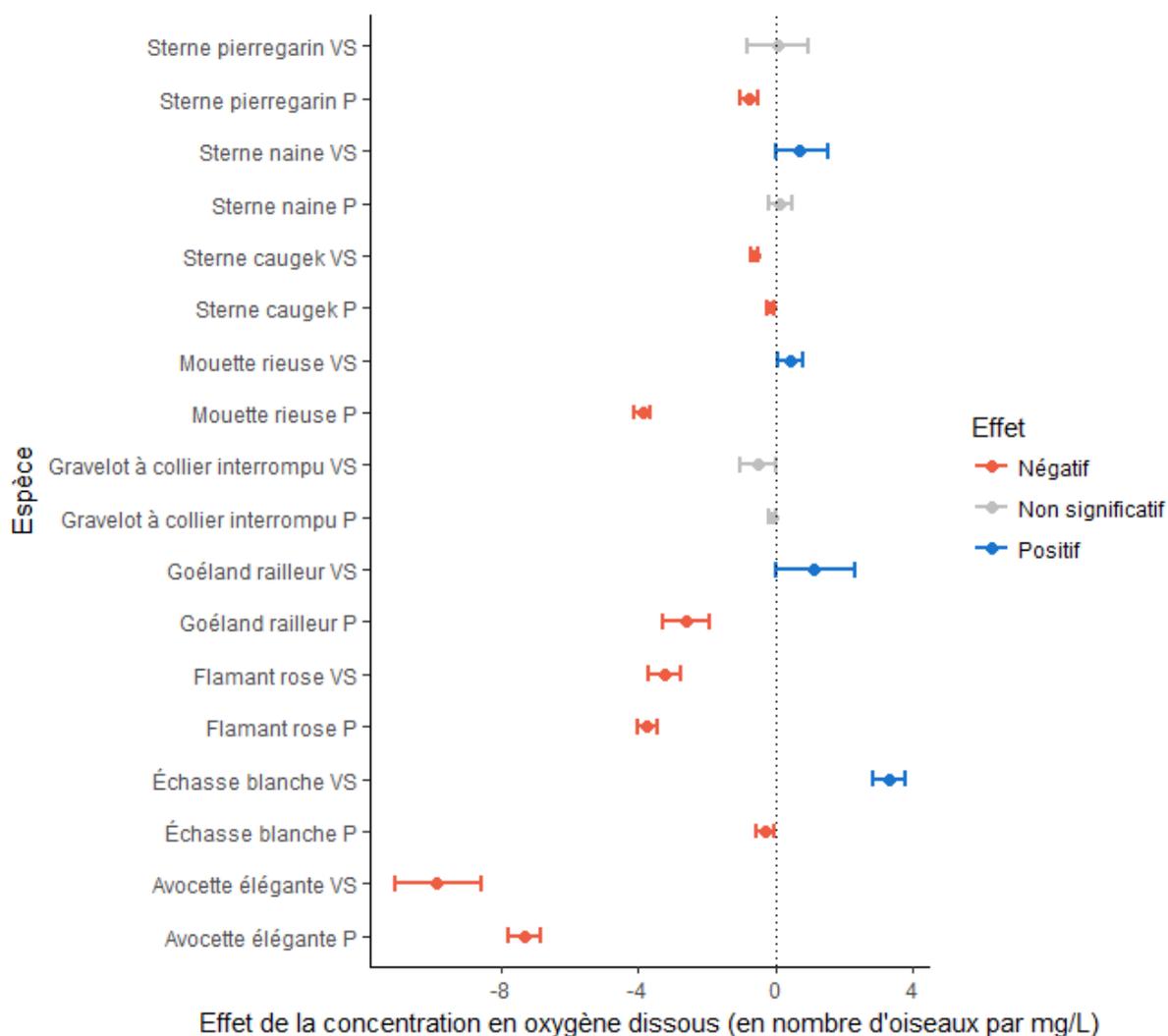


FIGURE 12: EFFETS DE LA CONCENTRATION EN OXYGENE DISSOUS SUR LES ESPECES ETUDIEES (EN NOMBRE D'OISEAUX PAR MG/L) SUR LES VIEUX SALINS (VS) ET SALIN DES PESQUIERS (P).

3.4 Réponses quadratiques

Les réponses obtenues à partir d'un modèle incluant à la fois termes linéaires et termes quadratiques permettent de mettre en évidence, lorsqu'elles existent, des valeurs optimales de paramètres physico-chimiques. Ces valeurs assurent la présence d'un maximum d'oiseaux pour chaque espèce.

Les courbes présentées dans ce paragraphe représentent les abondances relatives pour chaque espèce en fonction de la valeur du paramètre physico-chimique correspondant. Ces abondances relatives sont comprises entre 0 et 1. L'abondance vaut 1 à l'optimum. Ces courbes supposent que les autres paramètres physico-chimiques restent constants lorsque l'on fait varier le paramètre étudié.

3.4.1 Niveau d'eau

<i>Espèce</i>	<i>Profondeur optimale estimée</i>	<i>Commentaire</i>
<i>Avocette élégante</i>	14cm (Pesquiers) 16cm (Vieux Salins)	Sur l'ensemble de la zone d'étude, les Avocettes élégantes privilégient des niveaux d'eau compris entre 10 et 20cm (Fig.13). L'abondance reste relativement élevée pour les faibles valeurs de profondeurs (0-10cm) mais décroît rapidement au-delà de 25cm. Ces résultats sont tempérés par une forte incertitude sur les Vieux Salins.
<i>Echasse blanche</i>	7cm (Pesquiers) 0cm (Vieux Salins)	L'Echasse blanche est strictement inféodée aux zones peu profondes, avec une profondeur optimale de 7cm sur les Pesquiers et une profondeur optimale nulle (bassins dont la couverture en eau est partielle ou temporaire et bassins en voie d'assèchement) sur les Vieux Salins (Fig.13).
<i>Flamant rose</i>	>15cm	Les valeurs élevées de niveau d'eau (>25cm) sont occasionnelles et épisodiques sur les Vieux Salins. La décroissance observée pour ces valeurs est donc à relativiser par le caractère exceptionnel de ces événements (Fig.13).
<i>Goéland railleur</i>	<20cm (Pesquiers) >20cm (Vieux Salins)	Les réponses sont inversées entre les Vieux Salins et le salin des Pesquiers (Fig.13). Les Goélands railleurs recherchent les faibles profondeurs sur le salin des Pesquiers, et les bassins profonds sur les Vieux Salins.
<i>Gravelot à collier interrompu</i>	12 cm (Pesquiers) 0 cm (Vieux Salins)	Sur les deux sites, cette espèce fuit les fortes hauteurs d'eau (>20cm). L'optimum diffère toutefois entre les Pesquiers : 12cm, et les Vieux Salins : 0cm, soit les flaques et bassins à la couverture partielle en eau (Fig.13).

<i>Mouette rieuse.</i>	16cm (Pesquiers) 21cm (Vieux Salins)	L'espèce présente une préférence marquée pour les bassins intermédiaires à profonds de 10 à 30cm (Fig.13).
<i>Sternes</i>	20 cm (Pesquiers) pour la Sterne caugek et la Sterne pierregarin	Les trois sternes recherchent essentiellement des bassins profonds où elles peuvent s'alimenter sur les Vieux Salins. Sur les Pesquiers les Sternes caugek et pierregarin atteignent leur maximum d'abondance autour de 20cm de profondeur (îlots de nidifications et reposoirs sur pieux immergés) et fuient les zones sèches ou très profondes. La réponse de la Sterne naine sur les Pesquiers présente un intervalle de confiance très large et n'est donc vraisemblablement pas interprétable (Fig.13).

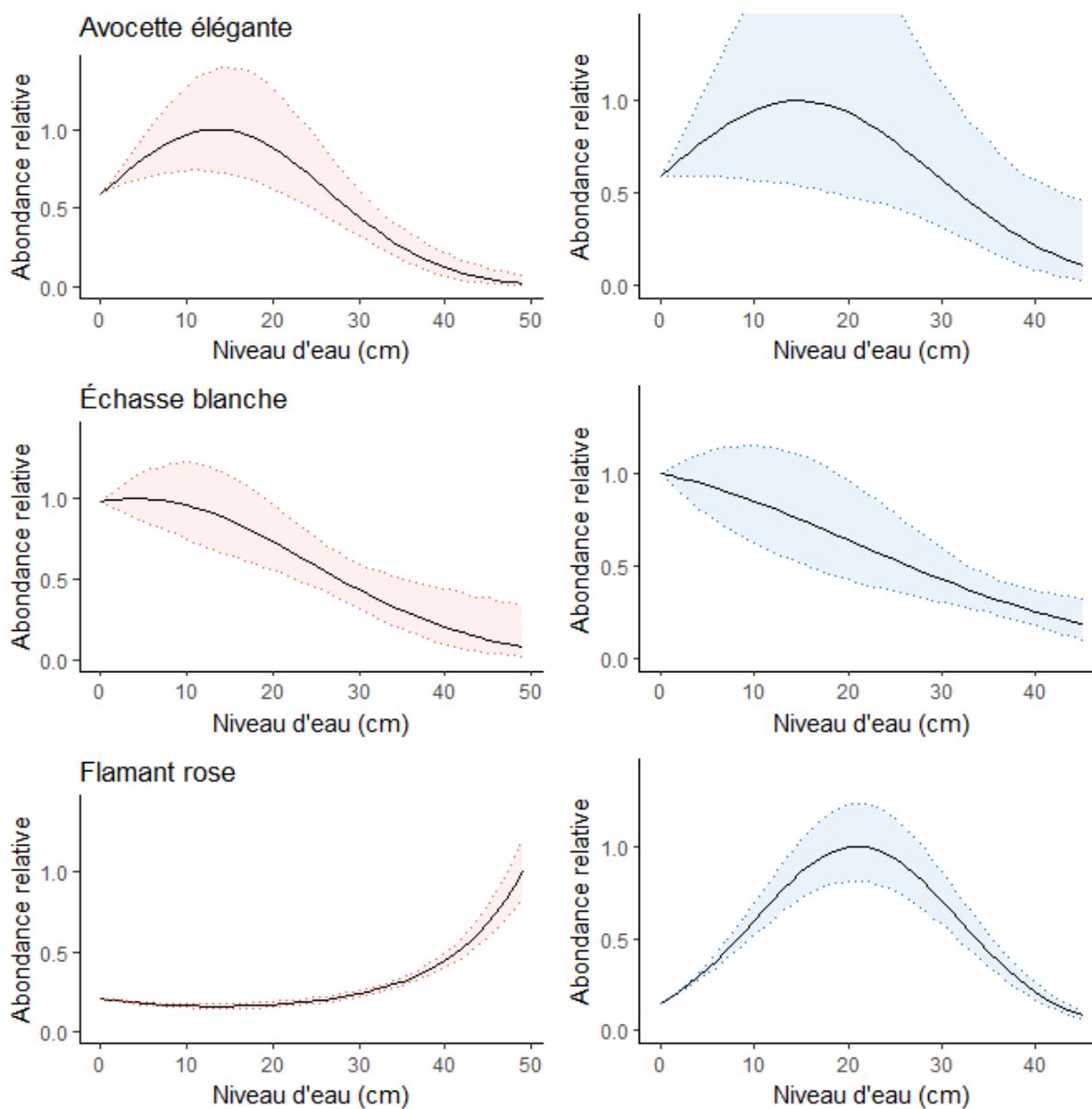


Figure 13 : Effet du niveau d'eau (en cm) sur l'abondance relative des Laro-limicoles du salin des Pesquiers (en rouge) et Vieux Salins (en bleu). Les intervalles de crédibilité à 95% sont représentés.

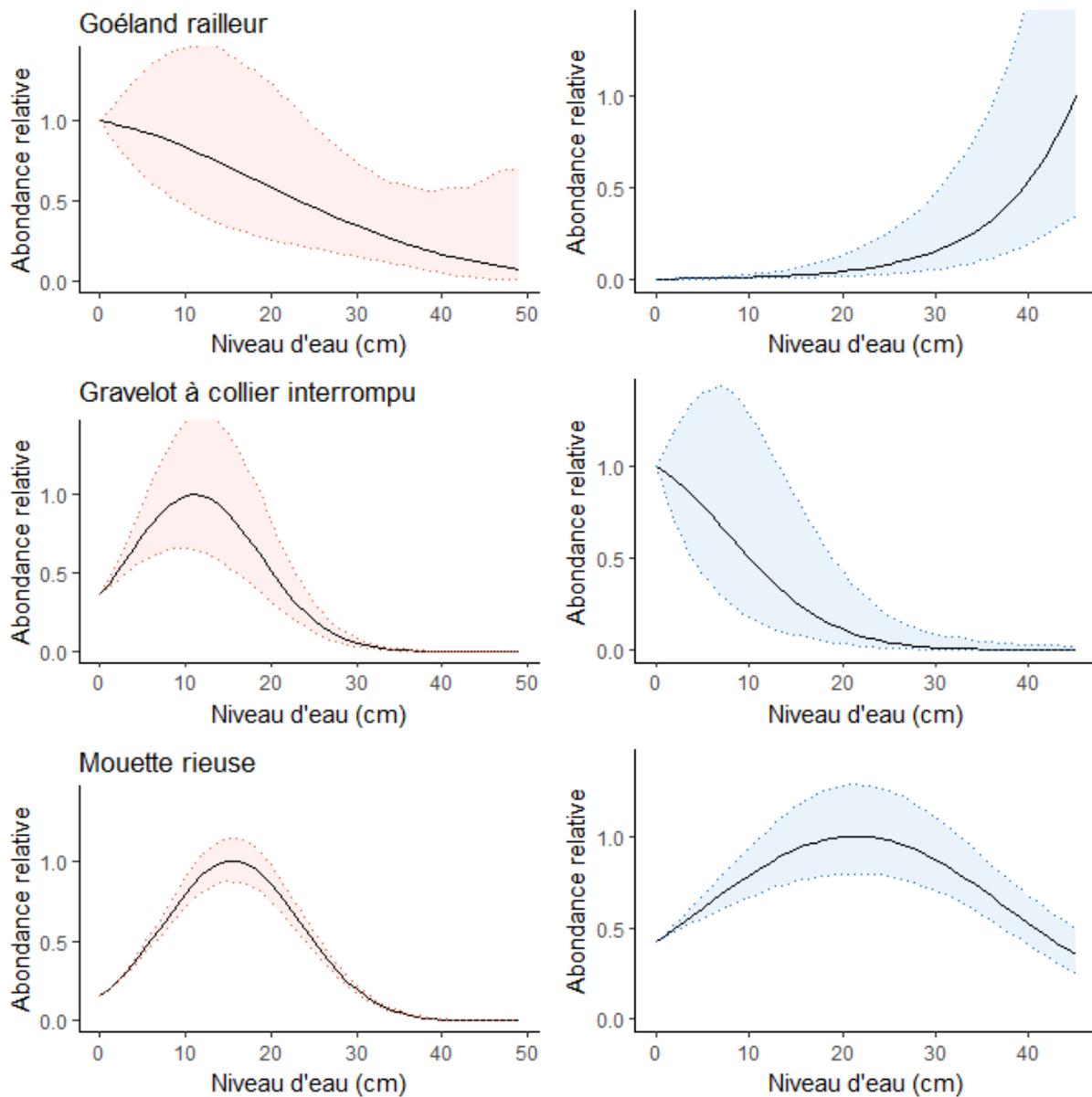


Figure 13 : Effet du niveau d'eau (en cm) sur l'abondance relative des Laro-limicoles du salin des Pesquiers (en rouge) et Vieux Salins (en bleu). Les intervalles de crédibilité à 95% sont représentés.

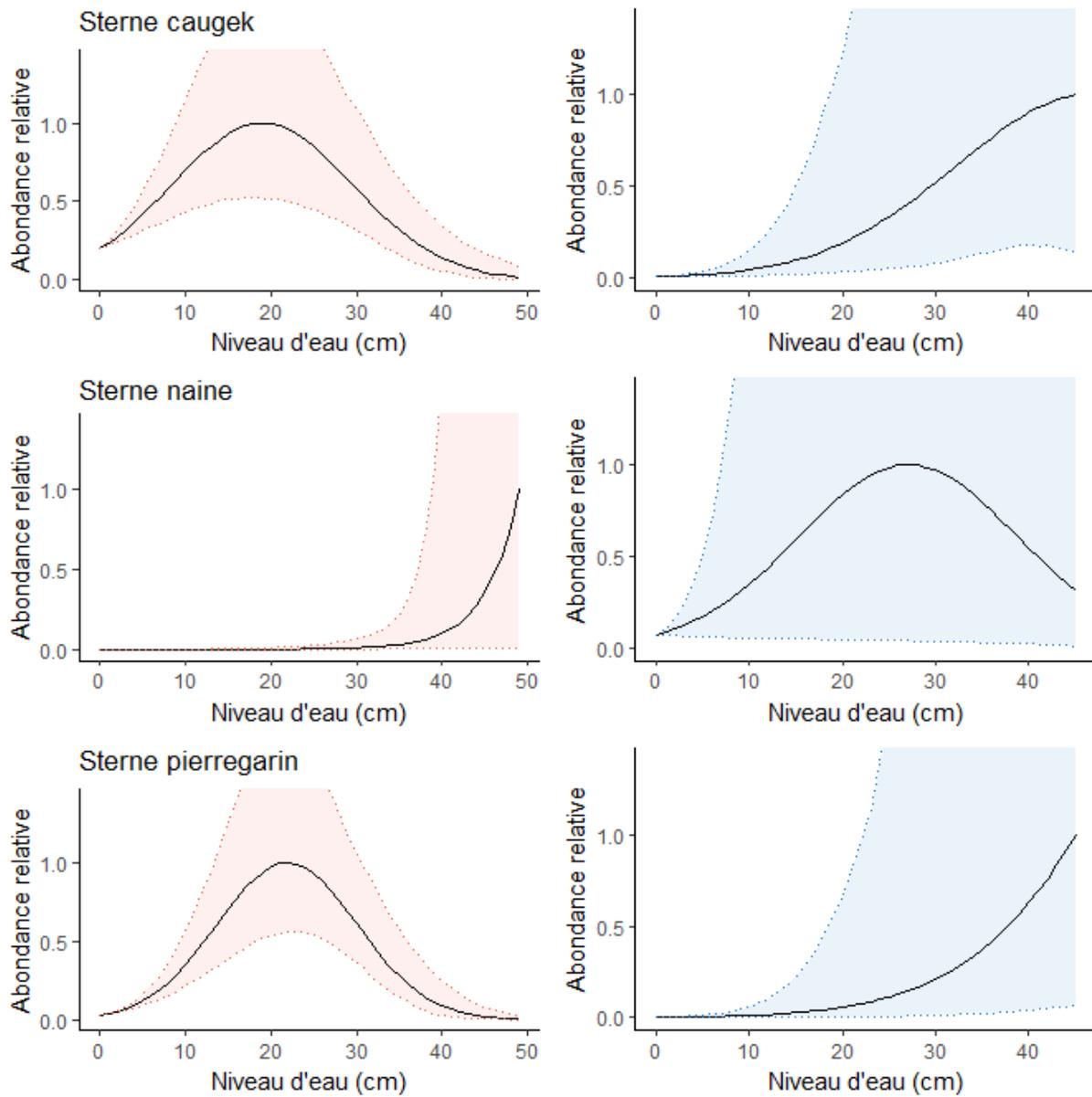


FIGURE 13: EFFET DU NIVEAU D'EAU (EN CM) SUR L'ABONDANCE RELATIVE DES LARO-LIMICOLES DU SALIN DES PESQUIERS (EN ROUGE) ET VIEUX SALINS (EN BLEU). LES INTERVALLES DE CREDIBILITE A 95% SONT REPRESENTES

3.4.2 Salinité

Lorsqu'elles existent, les valeurs optimales de salinité se situent en dessous de la salinité moyenne des salins, égale à 79.5g/L (Fig.14)

<i>Espèce</i>	Salinité optimale estimée	Commentaire :
<i>Avocette élégante</i>	<50g/L	Les Avocettes élégantes privilégient des salinités inférieures à 50g/L sur les deux sites. Sur les Vieux Salins elles fréquentent toutefois également les zones hypersalées (>100g/L), en cohérence avec l'effet linéaire positif obtenu sur ce site (Fig.11 et 14).
<i>Echasse blanche</i>	-	Il n'y a pas d'effet du sel sur l'abondance en Echasses blanches (Fig.14).
<i>Flamant rose</i>	40 à 75g/L (Pesquiers)	Le Flamant rose présente une abondance maximale pour des valeurs de salinités comprises entre 40 et 75g/L sur le salin des Pesquiers. Les oiseaux privilégient les zones moins salées sur les Vieux Salins (Fig.14).
<i>Goéland railleur</i>	<50g/L (Pesquiers) >70g/L (Vieux Salins)	Le Goéland railleur privilégie les salinités inférieures à 50g/L sur les Pesquiers (site de reproduction) et de l'ordre de 100g/L sur les Vieux Salins (site d'alimentation). L'incertitude est forte sur les Vieux Salins (Fig.14).
<i>Gravelot à collier interrompu</i>	<60g/L	Sur les deux sites, les effectifs diminuent avec la salinité (Fig.14).
<i>Mouette rieuse.</i>	<50g/L (Pesquiers) >75g/L (Vieux Salins)	Sur ses sites de nidification aux Pesquiers, elle privilégie les eaux peu salées. Au contraire, sur les Vieux Salins - sites de repos et de nourrissage - l'abondance augmente avec la salinité (Fig.14).
<i>Sterne caugek</i>	70g/L (Vieux Salins) <40g/L (Pesquiers)	Les Sternes caugek privilégient les zones de salinités inférieures à 40g/L sur les Pesquiers, ainsi que, dans une moindre mesure, les zones de salinités extrêmes (>90g/L). C'est en revanche la gamme opposée de salinité qui est préférée sur les Vieux Salins, avec une abondance maximale entre 60 et 80g/L (Fig.14).
<i>Sterne naine</i>	<50g/L	Cette sterne se cantonne aux zones de salinités inférieures à 50g/L sur les deux sites (Fig.14).
<i>Sterne pierregarin</i>	-	L'espèce présente un profil particulier, avec des abondances plus élevées aux valeurs minimales et maximales de salinité, ce qui résulte en un effet linéaire positif de la salinité (Fig. 11 et 14).

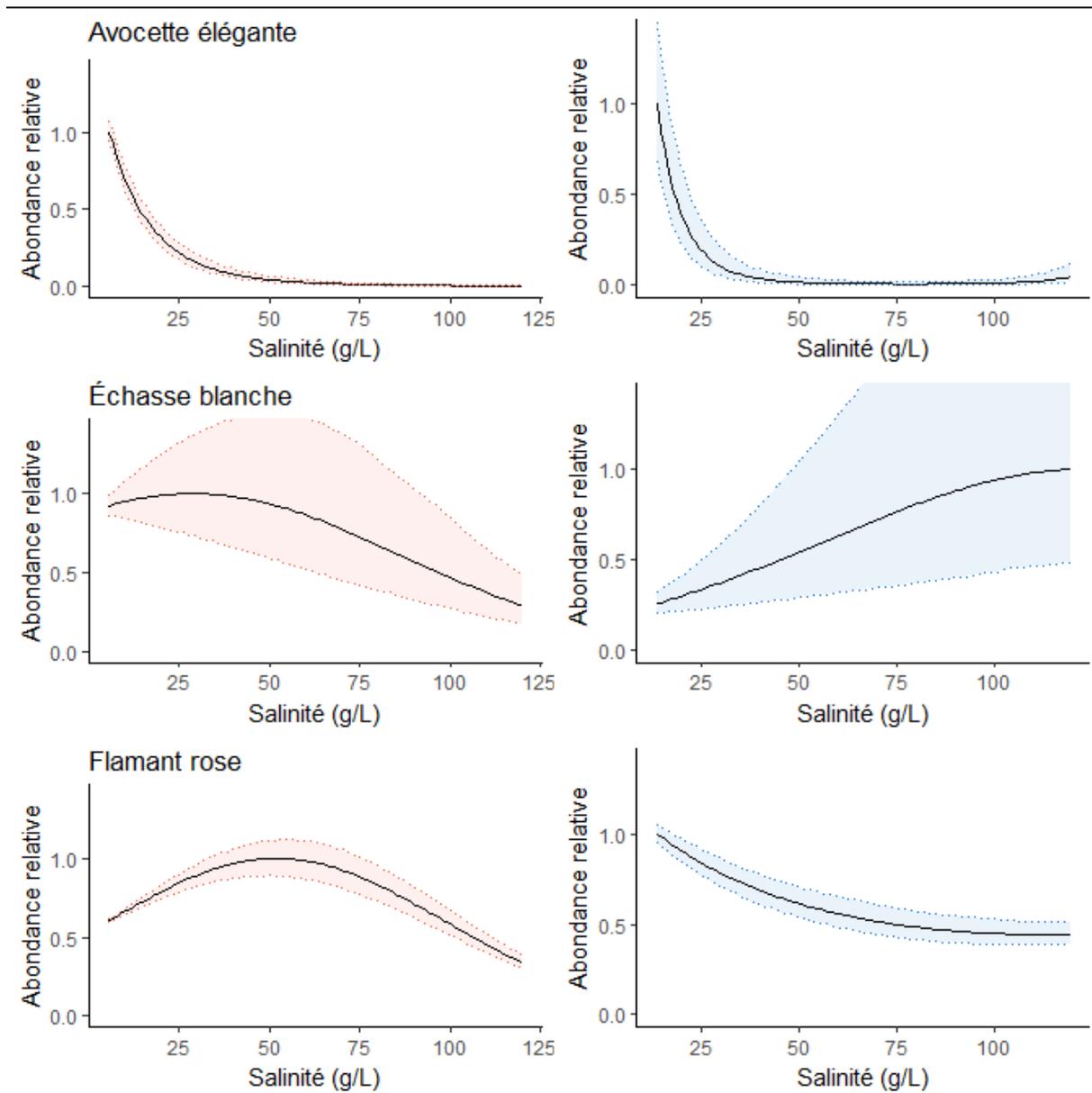


Figure 14 : Effet de la salinité (en g/L) sur l'abondance relative des Laro-limicoles du salin des Pesquiers (en rouge) et des Vieux Salins (en bleu). Les intervalles de crédibilité à 95% sont représentés.

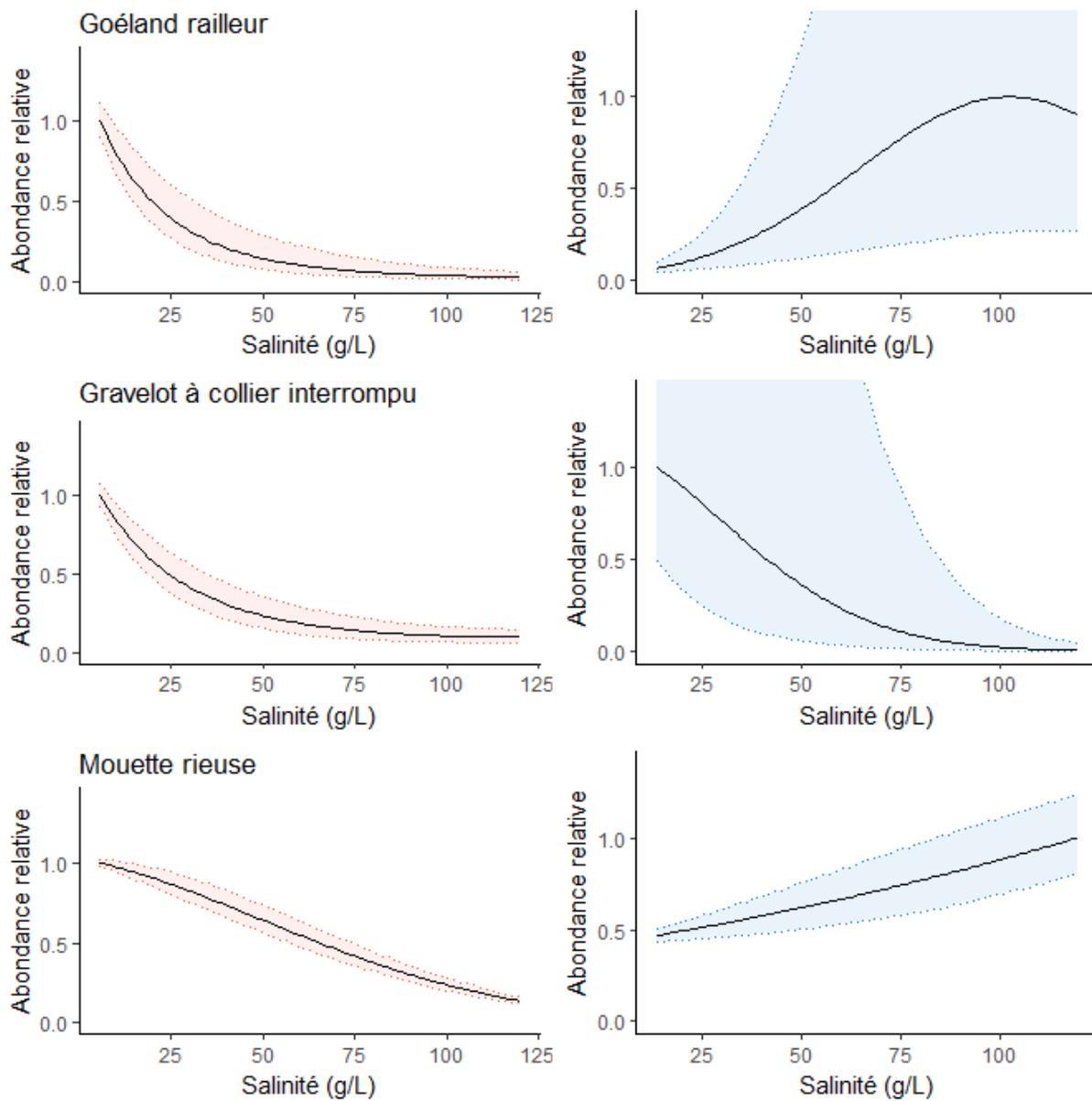


Figure 14 : Effet de la salinité (en g/L) sur l'abondance relative des Laro-limicoles du salin des Pesquiers (en rouge) et des Vieux Salins (en bleu). Les intervalles de crédibilité à 95% sont représentés.

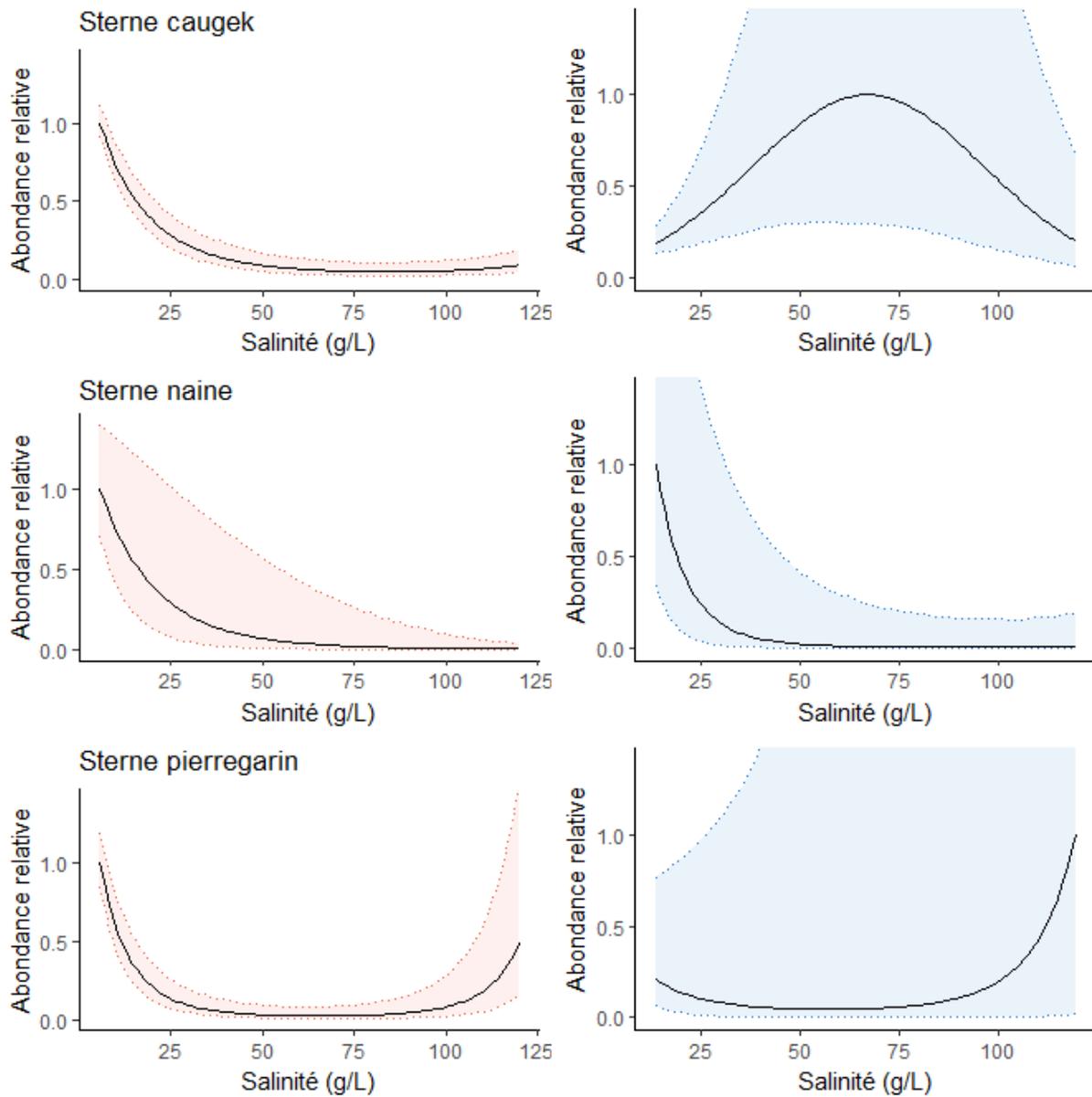


FIGURE 14 : EFFET DE LA SALINITE (EN G/L) SUR L'ABONDANCE RELATIVE DES LARO-LIMICOLES DU SALIN DES PESQUIERS (EN ROUGE) ET DES VIEUX SALINS (EN BLEU). LES INTERVALLES DE CREDIBILITE A 95% SONT REPRESENTES.

4.3.3 Concentration en oxygène dissous

Plusieurs espèces ne répondent pas à la concentration en oxygène dissous : c'est le cas de la Sterne naine, du Goéland rilleur, de l'Echasse blanche ou du Gravelot à collier interrompu (Fig 15). Notons toutefois les éléments suivants :

<i>Espèce</i>	Profondeur optimale estimée	Commentaire
<i>Avocette élégante</i>	7mg/L	Le nombre d'Avocettes élégantes décroît rapidement en dessous de 4mg/L et au-delà de 12mg/L (Fig 15).
<i>Flamant rose</i>	<8mg/L	Le Flamant rose s'oriente vers les zones pauvres en oxygène dissous (Fig 15).
<i>Goéland rilleur</i>	8mg/L (Pesquiers)	Pas d'effet significatif sur les Vieux Salins (Fig 15).
<i>Mouette rieuse.</i>	9mg/L (Vieux Salins) <9mg/L (Pesquiers)	La Mouette rieuse explore les gammes de faibles concentrations en oxygène sur le salin des Pesquiers, tandis qu'un optimum autour de 9mg/L se dessine sur les Vieux Salins (Fig 15).
<i>Sterne caugek</i>	>10mg/L	L'espèce préfère les faibles concentrations en oxygène (<10mg/L) sur les deux sites (Fig 15).

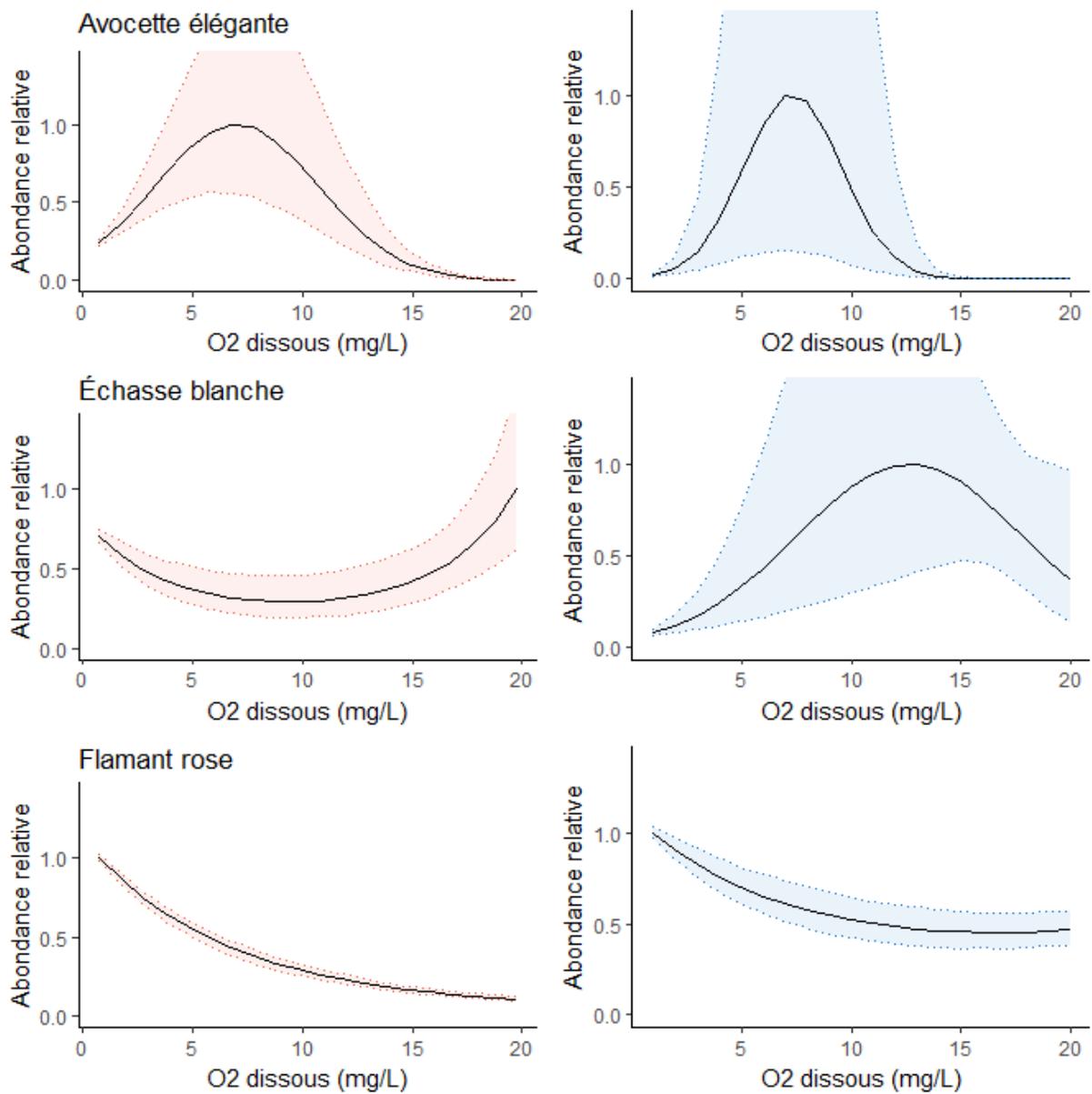


Figure 15: Effet de la concentration en oxygène dissous (en mg/L) sur l'abondance relative des Larolimicoles du salin des Pesquiers (en rouge) et des Vieux Salins (en bleu). Les intervalles de crédibilité à 95% sont représentés.

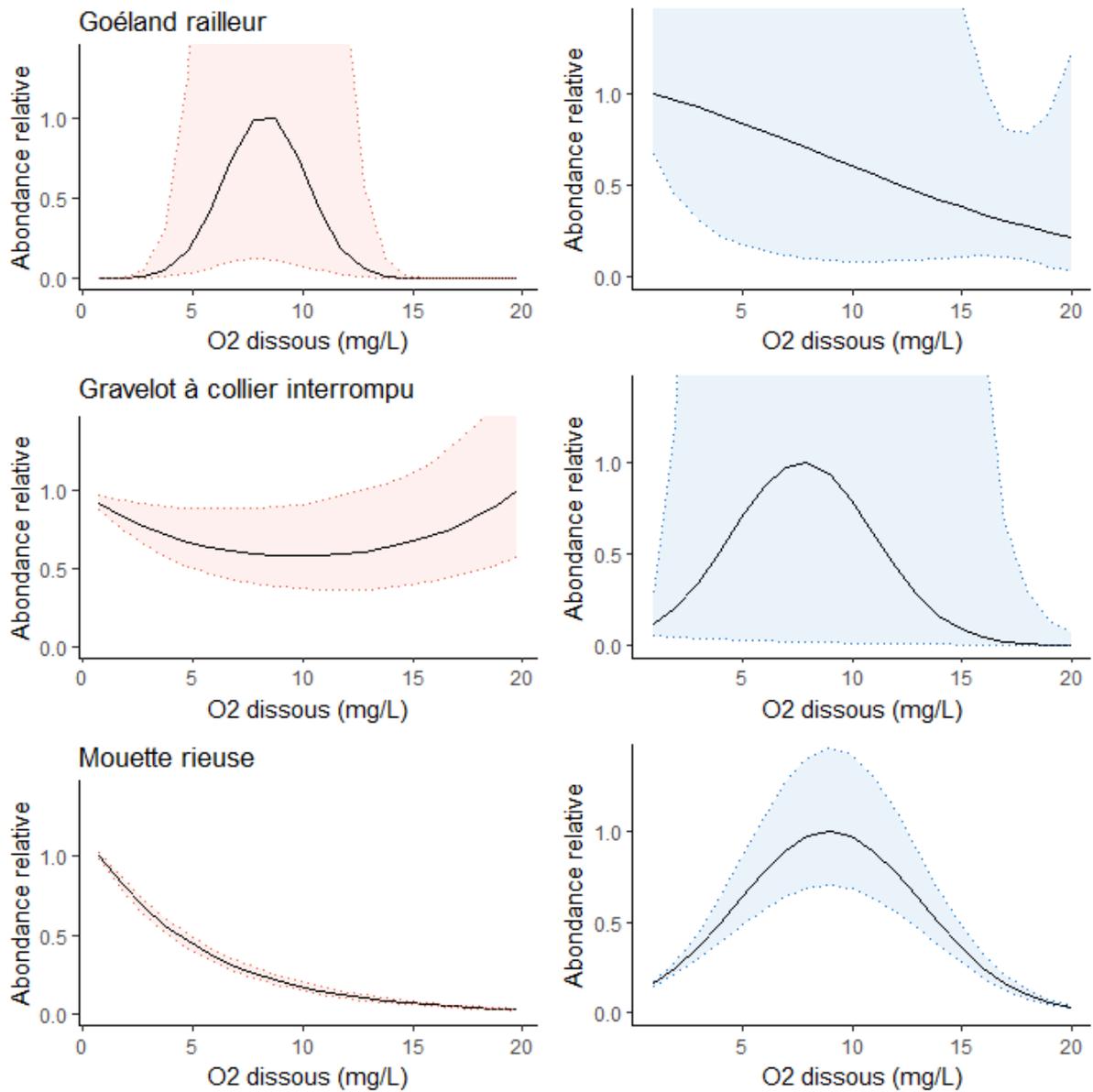


Figure 15: Effet de la concentration en oxygène dissous (en mg/L) sur l'abondance relative des Larolimicoles du salin des Pesquiers (en rouge) et des Vieux Salins (en bleu). Les intervalles de crédibilité à 95% sont représentés.

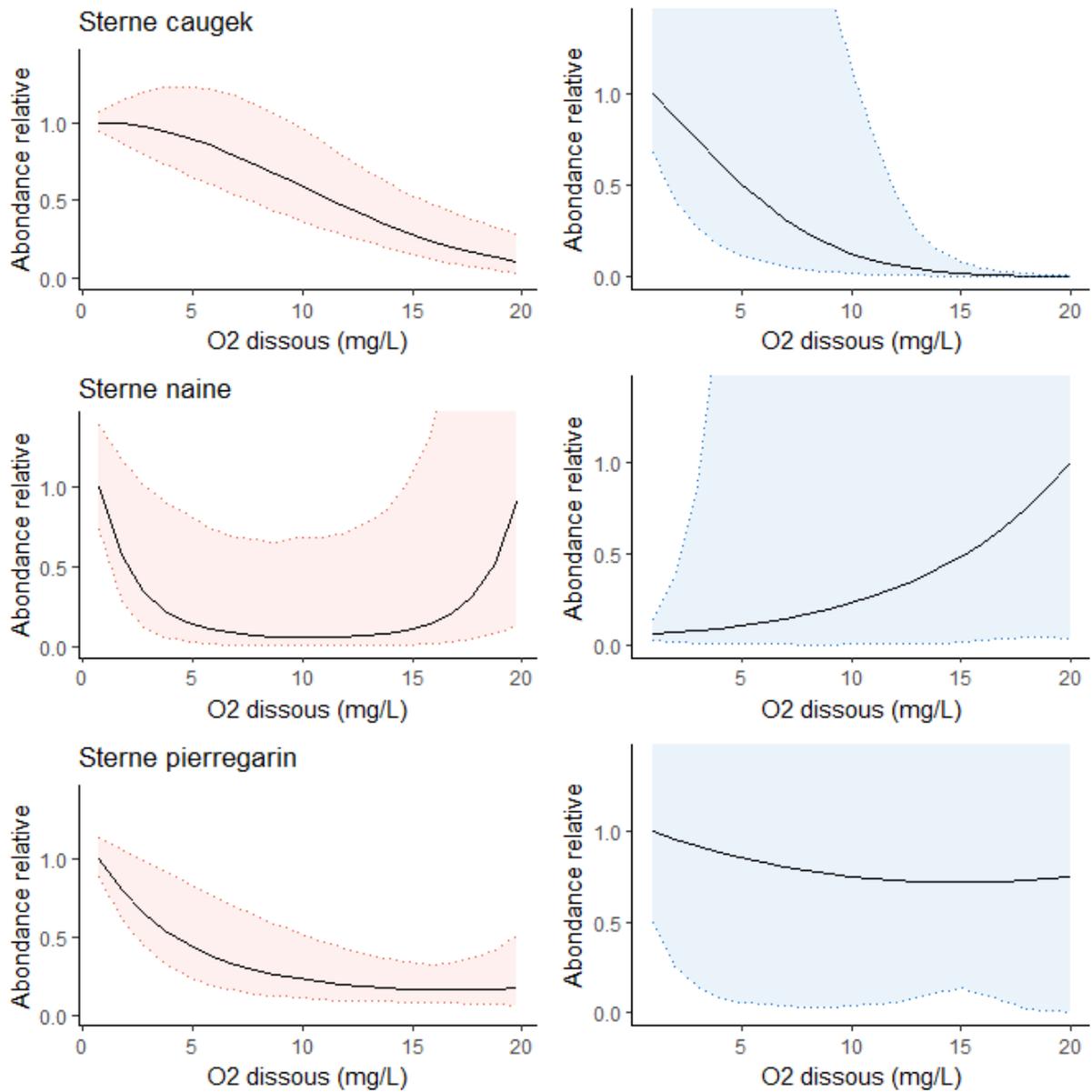


FIGURE 15: EFFET DE LA CONCENTRATION EN OXYGENE DISSOUS (EN MG/L) SUR L'ABONDANCE RELATIVE DES LARVICOLES DU SALIN DES PESQUIERS (EN ROUGE) ET DES VIEUX SALINS (EN BLEU). LES INTERVALLES DE CREDIBILITE A 95% SONT REPRESENTES.

4. Discussion

Notre étude met en évidence une différence d'attractivité entre le Sud du salin des Pesquiers, favorable à toutes les espèces, et les Vieux Salins, délaissés par les oiseaux. Pour la plupart des espèces, nous parvenons à déterminer une hauteur d'eau optimale, tandis que la concentration en oxygène dissous a peu d'effet sur les abondances spécifiques. Nous montrons que les abondances maximales en Laro-limicoles sont atteintes à des salinités inférieures à la salinité moyenne du site. Les effectifs diminuent avec la salinité pour la plupart des espèces. Les réponses aux paramètres physico-chimiques diffèrent entre les Vieux Salins et le salin des Pesquiers pour plusieurs espèces (Goéland railleur, Gravelot à collier interrompu pour le niveau d'eau).

4.1 Interprétation des résultats

4.1.1 Effet site.

D'après les résultats précédents, les Vieux Salins s'avèrent moins favorables que le salin des Pesquiers pour presque toutes les espèces. Les faibles effectifs actuellement recensés ne sont pas uniquement imputables à la gestion hydraulique du site. Par conséquent, on devra s'attendre à continuer d'observer des concentrations plus faibles de Laro-limicoles sur les Vieux Salins tant que des facteurs environnementaux extérieurs à la gestion hydraulique et défavorables à l'avifaune n'auront pas été identifiés : effet des sangliers, de l'absence de colonies de Laro-limicoles implantées qui dissuadent les oiseaux isolés de venir se poser sur le site, des reposoirs de Goélands leucophées, des activités annexes *etc.* peuvent être des pistes à explorer (communication personnelle équipe de gestion du site). Ces pistes peuvent faire l'objet de protocoles d'échantillonnages ciblés pour être validées ou infirmées.

Les cartes des effets sites permettent de déceler les secteurs ayant le plus fort potentiel pour chaque espèce. Elles peuvent être utilisées par le gestionnaire afin de cibler les bassins « à enjeux », sur lesquels les efforts pourront être concentrés.

C'est le cas notamment de toute la moitié Sud du salin des Pesquiers. Ce secteur combine de nombreux éléments favorables à l'installation des colonies de Laro-limicoles : il est relativement inaccessible à la fréquentation humaine, panache îlots de nidification entourés de zones plus profondes et vasières à pente faibles en périphérie. L'Étang Nord (bassin I) offre un réservoir de pêche profond pour les Sternidés. La moitié Sud du salin des Pesquiers est dotée d'une situation géographique avantageuse pour les oiseaux qui se nourrissent en mer (pointe Sud du site qui n'est séparée de la mer que par une digue étroite). Enfin, ce secteur est peu soumis aux prédateurs : régulation du Renard roux engagée depuis 2016, bassins relativement peu fréquentés par les Goélands leucophées par comparaison avec l'étang Neuf (bassin D) ou les Vieux Salins. Tous les facteurs précédemment mentionnés sont connus pour être limitants pour l'implantation des Laro-limicoles (Gomez Serrano et Lopez-Lopez, 2014 ; Botton, 1984 ; Berger *et al.*, 2015 ; Rocha *et al.*, 2016 ; Smit et Visser, 1993), et peuvent potentiellement expliquer cette attractivité élevée.

L'intérêt des Vieux Salins pour le Goéland railleur et le Gravelot à collier interrompu (bassin 2) méritent d'être soulignées malgré l'absence de nidification constatée, de même que l'attractivité des partènements extérieurs pour l'Echasse blanche (bassins B et C). Pour le Gravelot à collier interrompu, la faible attractivité observée sur l'étang Neuf (bassin D) et les

fortes attractivités du bassin 2 semblent contre-intuitives. L'étang Neuf est en effet l'un des bastions de l'espèce sur le site, tandis que les Gravelots à colliers interrompus sont rarement observés sur les Vieux Salins. Rappelons cependant que l'effet site ne traduit que la part des variations d'abondances non imputables à la gestion hydraulique du site. Une inadéquation de l'effet site à la réalité signifie donc que les effectifs présents sur les deux sites sont bien expliqués par les paramètres physico-chimiques : le bassin D est constitué de flaques peu profondes tandis que le bassin 2 est intégralement inondé. L'effet site compare une situation dans laquelle les deux bassins seraient inondés : les valeurs négatives sur le bassin D signifient que ce bassin perdrait alors tout son intérêt pour l'espèce. Pour le Gravelot à collier interrompu, il faut donc maintenir le bassin D dans son état actuel (bas).

Notons que certains bassins tels que le marais du Redon n'ont pas été inclus dans notre étude, faute de données physico-chimiques, alors qu'ils seraient probablement attractifs (au regard des effectifs de Laridés qu'ils abritent). L'absence d'informations sur ces bassins ne doit donc pas être comprise comme une absence d'enjeux. Par ailleurs, les Laro-limicoles étant des espèces grégaires, l'attractivité inclut probablement un effet positif du nombre d'oiseaux historiquement présents sur site. Toutes choses égales par ailleurs, un bassin sera plus attractif s'il accueille déjà des Laro-limicoles (Luis et Goss-Custard, 2005).

4.1.2 Effets du niveau d'eau et différences fonctionnelles entre salin des Pesquiers et Vieux Salins

Les réponses aux niveaux d'eau sont interprétables au regard de l'écologie des neuf espèces considérées. Les Laridés (Sternes, Mouette rieuse), espèces piscivores, répondent positivement à la hauteur d'eau (Paiva *et al.*, 2007, Bugoni *et al.*, 2015, Larsson et Olsen, 2010). Ils forment des reposoirs sur les îlots et digues en bordure des bassins profonds. A l'inverse, les Limicoles consomment des invertébrés chassés au sol en parcourant à pied des zones peu profondes ou fraîchement exondées, et sont inféodés aux faibles hauteurs d'eau (Chandler, 2010).

Les résultats mettent toutefois en évidence une réponse différenciée entre les deux sites pour des espèces comme le Goéland railleur ou le Gravelot à collier interrompu. Les Goélands railleurs semblent privilégier les faibles profondeurs et faibles salinités sur le salin des Pesquiers tandis que les fortes salinités et profondeurs d'eau s'avèrent attractives sur les Vieux Salins. Ce résultat fait sens à la lumière du comportement des oiseaux sur chacun des deux sites : ils nichent et se reposent sur le salin des Pesquiers tandis que les Vieux Salins sont principalement utilisés comme sites d'alimentation de l'espèce (observations Aurélien Audevard). Le Goéland railleur sélectionnerait ainsi deux types d'habitats voisins : un site de nidification et un site de nourrissage, différents d'un point de vue physico-chimique. Cette dualité est caractéristique d'une espèce connue pour s'installer à l'interface de milieux instables et imprévisibles, avec de grandes capacités de dispersion inter-sites (Sanz-Aguilar *et al.*, 2014). De même, les Gravelots à collier interrompu recherchent les très faibles profondeurs d'eau sur les Vieux Salins, en cohérence avec les exigences écologiques de l'espèce sur ses zones d'alimentation. Les pattes courtes de l'espèce empêchent le déplacement à pieds à des profondeurs supérieures à 5cm (Demongin, 2013). L'espèce est ainsi observée en alimentation sur des nappes d'eau très peu profondes, voire des flaques temporaires. Sur le salin des Pesquiers, où se situe l'intégralité des nids, la hauteur optimale se trouve toutefois vers 12cm, alors que l'espèce est connue pour nicher dans des milieux secs. L'affection pour les zones plus profondes y est vraisemblablement liée à la contrainte écologique de trouver un plan d'eau permanent à proximité des sites de nidification (Bouakkaz *et al.*, 2017 ; Chandler, 2010). L'espèce ne fait que se nourrir et hiverner sur les Vieux Salins, mais elle niche sur les digues, îlots voire radeaux flottants aux Pesquiers (LPO PACA 2015).

La hauteur de 12cm correspond donc plutôt à une exigence liée aux milieux périphériques du site de nidification.

Ces réponses divergentes suggèrent une différence fonctionnelle entre les deux sites (en termes d'utilisation par les oiseaux). Les Laro-limicoles utilisent les Vieux Salins exclusivement pour s'alimenter, tandis que le salin des Pesquiers sont également utilisés pour les habitats favorables à la nidification qu'ils offrent. En conséquence, les sites ne doivent pas être gérés exactement de la même façon : les plans de gestions devront prendre en compte les différences d'utilisation des ressources par l'avifaune, et proposer des adaptations à chacun des sites selon les objectifs que se fixe le gestionnaire.

Toute tentative d'extrapolation de ces résultats doit être relativisée par la résolution grossière de la variable niveau d'eau. Le niveau d'eau mesuré au point de relevé physico-chimique ne reflète pas la réalité de la hauteur d'eau sur la totalité du bassin. Un bassin dont la profondeur est de 15cm peut abriter de larges vasières recouvertes par un ou deux centimètres d'eau. Cette situation est fréquente sur l'étang Sud (bassin K), profond autour de l'îlot à flamants, mais où des vasières émergent sur toute la bordure Ouest.

4.1.3 Effets de la salinité.

La majorité des espèces nicheuses présente une réponse négative aux salinités extrêmes (>60g/l). Pourtant, la salinité moyenne du site s'élève à 79.5g/L, ce qui signifie que les Laro-limicoles s'accommodent de conditions chimiques défavorables sur les salins. Les abondances sont pour presque toutes les espèces maximales à des valeurs de salinité inférieures à la moyenne des sites. Deux explications sont possibles :

- La gestion du site sur le mode de fonctionnement d'un marais salant offre des avantages à l'échelle de la globalité des salins (diversité d'habitats et de ressources alimentaires spécifiques aux salins, zone de relative tranquillité avec peu de perturbations directes). Ces effets à l'échelle de la totalité du site contrebalancent l'effet négatif local de la salinité et contribuent ainsi à l'attractivité des salins.
- La contrainte exercée par l'absence de zones humides naturelles sur le littoral Méditerranéen est si forte (urbanisation du trait de côte, drainage des zones marécageuses, sur-fréquentation des plages, exploitation des zones humides à des fins industrielles) que les Laro-limicoles n'ont pas d'autres choix que de nicher dans des environnements qui leurs sont peu favorables d'un point de vue écologique (GEST Ramsar, 2015). En particulier, le littoral Méditerranéen n'offre pas vraiment d'autres habitats naturels alternatifs où les oiseaux pourraient se réfugier (Tour du Valat, 2014).

En l'absence de zone humide naturelle comparable sur plusieurs centaines de kilomètres de trait de côte, il n'est pas possible de déterminer laquelle de ces deux explications prévaut, et il est probable que ces deux effets sont imbriqués.

Notons également que certaines espèces, telles que la Sterne pierregarin sont attirées à la fois par les faibles salinités (<40g/L) et les salinités extrêmes (>100g/L). Cette espèce niche et pêche dans des eaux dont la salinité est inférieure ou égale à celle de la mer (<38g/L) sur les lacs intérieurs ou au large, mais forme des reposoirs sur les grands bassins en assec dépourvus de végétation, qui se caractérisent par des salinités extrêmes (Bugoni *et al.*, 2015 ; Burger et Gochfeld, 2016).

Il est donc probable que la réponse à la salinité résulte de deux effets opposés :

- un effet négatif du sel qui contraint le métabolisme des Laro-limicoles (Gutierrez et al., 2015 ; Gutierrez *et al.*, 2011). Les dépenses énergétiques des Laro-limicoles augmentent avec la salinité, rendant l'exploitation des ressources alimentaires particulièrement éprouvante sur les bassins les plus salés.
- un effet positif lié à la structuration de la végétation. Les salinités extrêmes imposent une végétation éparsée et rase, voire inexistante (Munns, 2002), offrant des zones dégagées où les prédateurs sont plus aisément repérables. Ceci n'explique cependant pas la réponse aux variations intra-annuelles de salinités.

Enfin, la présence d'un gradient de salinité pourrait s'avérer favorable à l'apparition de communautés avifaunistiques mutualistes constituées d'espèces spécialisées dans des ressources différentes. La Sterne pierregarin s'établit par exemple dans les colonies d'Avocettes élégantes, qui pourchassent hargneusement les prédateurs hors des sites de nidification (Burger et Gochfeld, 2016). Il n'est donc pas surprenant de trouver une parfaite coïncidence des réponses dans la gamme basse des salinités chez ces deux espèces, qui correspondent aux sites de reproductions communs, alors même que les réponses divergent aux fortes salinités.

En conséquence, nous recommandons au gestionnaire de veiller à maintenir des zones peu salées sur chacun des sites au cours de la saison de reproduction des Laro-limicoles coloniaux. Nos résultats suggèrent en effet que la présence de certains bassins à des salinités voisines de celles de la mer : 38g/L (LERM, 2015), profite à l'avifaune nicheuse. Le contrôle de cette salinité peut être réalisé par le levier de la gestion hydraulique, en privilégiant l'entrée directe d'eau de mer, et une circulation de l'eau plus rapide et continue sur les bassins que l'on souhaite maintenir à de faibles niveaux de salinité, principe déjà mentionné dans le plan de gestion actuel. Des salinités modérées devraient en particulier être privilégiées sur le salin des Pesquiers au voisinage immédiat des zones de reproduction. Des sites secs, salés, composés de flaques d'eau peu profondes où le sel cristallise devront toutefois être préservés, notamment sur la partie Nord-Ouest du salin des Pesquiers. Ces habitats sont en effet vitaux pour le Gravelot à collier interrompu (Communication personnelle Aurélien Audevard).

4.2 Recommandations pour le gestionnaire

4.2.1 Recommandations pour la gestion hydraulique du site

La synthèse des éléments mentionnés précédemment nous conduit à suggérer les éléments suivants :

- Sur les deux sites :
 - Le maintien d'au moins quelques bassins de salinité proches des 38g/L de la mer Méditerranée (inférieures à 60g/L).
 - La conservation d'une gestion différenciée des bassins, avec une représentation de toute la gamme des niveaux d'eaux (de 0cm aux profondeurs maximales de l'Étang Nord) toute l'année.
- Sur les Vieux Salins :
 - Le maintien de bassins profonds à des salinités moyennes (40-80g/L), qui servent à l'alimentation du Flamant rose et du Goéland rائلeur.
 - Globalement, une circulation continue de l'eau afin de limiter les zones de salinités extrêmes (>80g/L), en particulier sur les bassins les plus attractifs (2A, 3B), au cours de la période de reproduction.
 - En période de migration, il serait intéressant de faire fluctuer les niveaux d'eau de façon plus progressive que ce qui est actuellement réalisé, afin de maintenir un *continuum* de hauteurs d'eau. La succession brutale de phases avec un niveau d'eau élevé puis un assec total nuit à la diversité de conditions physico-chimiques représentées sur les Vieux Salins, et par conséquent à la diversité avifaunistique rencontrée.
- Sur le salin des Pesquiers :
 - La préservation de niveaux d'eaux suffisants (>15cm) autour des zones de forte attractivité des Laridés et des Avocettes élégantes (bassins J et A en particulier), dans la continuité de la stratégie de gestion actuelle (cette hauteur d'eau constituant une barrière physique à l'égard des prédateurs tels que le renard).
 - La présence de bassins profonds à proximité immédiate de colonies de Laridés (sur le modèle du bassin I).
 - La conservation de vasières peu profondes (<5cm) sur les sites favorables aux petits Limicoles (bassins K, D et B), en évitant, si possible, les phénomènes de concentration du sel conduisant à des valeurs de salinité extrêmes.
 - Le maintien de zones sèches avec des flaques peu profondes pour le Gravelot à collier interrompu en période de nidification (bassin D)

4.2.2 Recommandations pour les suivis physico-chimiques ultérieurs

Amélioration de la finesse d'information sur les faibles hauteurs d'eau

Un bassin est actuellement considéré comme étant en assec lorsque moins de 50% de sa superficie est recouverte par de l'eau. La hauteur d'eau reportée est alors de 0cm.

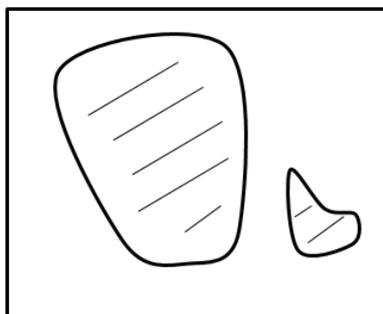
Les petites espèces de Limicoles (Gravelots) affectionnent les flaques peu profondes, voire temporaires, entourées de terres fraîchement émergées par assèchement. Par conséquent, il existe une différence radicale du point de vue de l'écologie de ces espèces entre :

- un bassin recouvert à 40% d'un fin film d'eau.
- un bassin entièrement asséché.

Pourtant, les relevés physico-chimiques correspondants seront identiques sur ces deux bassins hypothétiques. Ces informations perdues dans la quantification actuelle du niveau d'eau conduisent à des approximations dans le modèle, entraînant une mauvaise estimation de l'effet des faibles profondeurs en eau sur les espèces les plus sensibles.

Il est possible d'augmenter la finesse du niveau d'eau en ajoutant une carte de chaque bassin au formulaire de relevé, sur laquelle l'agent de terrain serait chargé de dessiner grossièrement la forme de la surface recouverte en eau (Fig. 16).

Cette donnée peut être traitée à posteriori pour quantifier les surfaces en eau exploitables à l'aide d'une grille sur papier calque (Le nombre de carrés en eau dans la grille donne le pourcentage du bassin qui est réellement en eau).



Bassin 2A

FIGURE 16: EXEMPLE DE REPRESENTATION DE LA SURFACE EN EAU DU BASSIN A MAIN LEVEE.

Uniformisation des mesures de la salinité :

La mesure de la salinité au cours des relevés physico-chimiques s'effectue avec deux appareils :

- Une sonde, dont la gamme de mesure correspond à l'intervalle [0g/L, 120g/L].
- Lorsque la salinité affichée par la sonde est égale à 120g/L (c'est-à-dire lorsque la salinité réelle est supérieure à 120g/L), un densimètre doit être utilisé pour déterminer la salinité réelle.

En pratique, de nombreuses mesures de salinité n'ont pas été mesurées au densimètre

Ceci a conduit à une perte d'information quant à l'effet de la salinité sur l'avifaune :

- Dans le modèle, toutes les valeurs supérieures à 120g/L ont été tronquées et ramenées à la valeur seuil.
- Par conséquent, le domaine des salinités très élevées (>120g/L) n'a pas pu être exploré en terme de réponse de l'avifaune.
- Ces salinités extrêmes sont relativement répandues sur les salins (elles correspondent à environ 20% des bassins en été), ce qui induit une perte d'information non négligeable.

Nous estimons que l'acquisition de données relatives aux fortes salinités présente un intérêt suffisant en termes d'évaluation des pratiques de gestion pour justifier le recours systématique au densimètre en vue de quantifier précisément les salinités très élevées.

Meilleure adéquation des points de relevés aux sites utilisés par les oiseaux :

Sur de nombreux bassins (Vieux Salins, Etang Sud des Pesquiers) le point de relevé physico-chimique est situé sur un secteur qui n'est pas utilisé par les oiseaux. Les niveaux d'eau, salinités et concentration en oxygène mesurés ne sont donc pas forcément corrélés aux conditions réelles perçues par les oiseaux. Afin d'améliorer cette correspondance nous recommandons au gestionnaire de définir les points de relevés physico-chimiques après consultation de l'ornithologue en charge du suivi du site.

Conclusion

Nous avons pu quantifier la réponse des Laro-limicoles nicheurs aux niveaux d'eaux, à la salinité et à la concentration en oxygène dissous sur le site Ramsar des Salins d'Hyères. Ces paramètres sont directement ou indirectement modulables à travers la gestion hydraulique du site (décisions relatives à l'ouverture ou à la fermeture du réseau hydraulique, circulation ou stagnation de l'eau...). Ils offrent ainsi un levier d'action au gestionnaire pour la conservation des espèces d'oiseaux nicheuses, dans la limite de ce qui est techniquement faisable (coûts du pompage) et de la prise en compte des autres taxons (Poissons par exemple). La gestion hydraulique peut donc être utilisée pour répondre aux objectifs des grands schémas nationaux et internationaux de conservation de l'avifaune.

D'un point de vue plus fondamental, notre étude permet de mieux comprendre la dynamique des oiseaux en milieu changeant, stressant et dans une matrice hostile. Nous trouvons un effet négatif des fortes salinités sur les espèces considérées. Cet effet ne remet pas en cause la gestion du site comme surface partiellement salinière, mais caractérise les salins comme des zones refuges, où les Laro-limicoles doivent faire face à des conditions chimiques extrêmes pour trouver des habitats et ressources qui n'existent plus ailleurs sur le littoral méditerranéen.

Ces travaux peuvent être exploités afin de comparer différents scénarios de gestion. Les résultats cartographient également les potentialités des différents bassins. Ils pourront ainsi éclairer le gestionnaire dans le choix des bassins sur lesquels les efforts devront être ciblés en priorité. La caractérisation de la composition des communautés avifaunistiques et ses distributions spatiales lui permettront d'accéder rapidement à toute information recherchée sur les oiseaux des salins. Ces cartes et graphes pourront servir de point de départ aux travaux futurs.

Un prolongement envisageable du travail réalisé consisterait à analyser l'effet de paramètres extérieurs à la gestion hydraulique sur les Laro-limicoles. Le contrôle des populations de Renard roux depuis 2016 semble donner des résultats encourageants sur le nombre de jeunes à l'envol. Une analyse de l'impact de la prédation et de la compétition interspécifique au sens large (Sanglier, Goéland leucophée) pourrait donc permettre d'explicitier davantage l'attractivité de certains bassins, complétant ainsi la présente étude. Au regard de l'intérêt du site pour l'hivernage des Anatidés, l'élargissement de la présente étude à d'autres familles telles que les Canards de surface pourrait compléter les résultats obtenus, notamment par l'étude de l'effet de développement d'herbiers de macrophytes.

Notre travail montre enfin que la réalisation de suivis de haute résolution et sur une longue durée permet d'acquérir suffisamment d'informations pour émettre des recommandations de gestion afin de répondre aux enjeux locaux, régionaux et internationaux de conservation. La collaboration entre chercheurs et gestionnaires consolide ces suivis de manière itérative et apporte un fondement scientifique aux plans de gestion adoptés.

Bibliographie

- Béchet, Arnaud, Christophe Germain, Alain Sandoz, Graham J. M. Hiron, Rhys E. Green, John G. Walmsley, et Alan R. Johnson. « Assessment of the Impacts of Hydrological Fluctuations and Salt Pans Abandonment on Greater Flamingos in the Camargue, South of France ». *Biodiversity and Conservation* 18, n° 6 (juin 2009): 1575-88. doi:10.1007/s10531-008-9544-8.
- Berger, Gérard, Elsa Bonnaud, et Jérôme Legrand. « Surveillance et gestion des populations de goélands leucophées (*Larus michahellis*) des îles d'Hyères », octobre 2015.
- Biolovision. « Naturalist, portail de saisie de données », 2017. http://data.biolovision.net/index.php?m_id=1&lang=fr.
- Birdlife International, Site internet de Birdlife international, s. d. <http://www.birdlife.org>.
- Birtsas, Periklis K., Christos K. Sokos, Konstantinos G. Papaspyropoulos, et Yannis E. Kazoglou. « Comparison of Waterbird Communities in a Mediterranean Salina - Saltmarsh Complex ». *BELGIAN JOURNAL OF ZOOLOGY* 141, n° 1 (janvier 2011): 24-31.
- Borel, Nicolas. « Site des Salins d'Hyères Nouvel état des lieux de la végétation aquatique ». Conservatoire du Littoral, octobre 2013.
- Botton, M.L. « Effects of Laughing Gull and Shorebird Predation on the Intertidal Fauna at Cape May, New Jersey ». *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 18, n° 2 (février 1984): 209-20. doi:10.1016/0272-7714(84)90107-0.
- Bouakkaz, Amel, Khawla Belhassini, Taqiyeddine Bensouilah, Mourad Abdelkrim Bensouilah, et Moussa Houhamdi. « Breeding Behaviour of the Kentish Plover (*Charadrius Alexandrinus*) in a Salt Marsh from the Eastern High Plateaux, Northeast Algeria ». *Journal of King Saud University - Science* 29, n° 3 (juillet 2017): 291-301. doi:10.1016/j.jksus.2016.05.006.
- Burger, Joanna, et Michael Gochfeld. « Nest and Colony Site Selection in Common Terns (*Sterna Hirundo*) in Mongolia ». *Waterbirds* 39, n° 4 (décembre 2016): 402-7. doi:10.1675/063.039.0409.
- Chandler, Richard J. *Shorebirds of North America, Europe, and Asia: A Photographic Guide*. Princeton: Princeton University Press, 2009.
- Colwell, Mark A. *Shorebird ecology, conservation, and management*. University of California Press., 2010.
- Conseil de l'Europe. « Convention on the Conservation of European Wildlife and Natural Habitats », 1982. <http://www.coe.int/en/web/conventions/full-list/-/conventions/treaty/104>.
- Conservatoire du Littoral. « Plan de gestion des Salins d'Hyères », juin 2005.
- Demongin, Laurent. *Guide d'identification des oiseaux en main*. Crexeco., 2013.
- Deville, Anne-Sophie, David Grémillet, Michel Gauthier-Clerc, Matthieu Guillemain, Friederike Von Houwald, Bruno Gardelli, et Arnaud Béchet. « Non-Linear Feeding Functional Responses in the Greater Flamingo (*Phoenicopterus Roseus*) Predict Immediate Negative Impact of Wetland Degradation on This Flagship Species ». *Ecology and Evolution* 3, n° 5 (mai 2013): 1413-25. doi:10.1002/ece3.554.

- Dias, Maria P. « Use of Salt Ponds by Wintering Shorebirds throughout the Tidal Cycle ». *WATERBIRDS* 32, n° 4 (décembre 2009): 531-37. doi:10.1675/063.032.0406.
- DIREN PACA. « DOCOB Natura 2000 FR9312008 », octobre 2007. [http://www.side.developpement-durable.gouv.fr/EXPLOITATION/DEFAULT/doc/IFD/IFD_REFDOC_0509831/Document-d'objectifs-\(DOCOB\)-sites-Natura-2000-FR9301613-Rade-d'Hy%C3%A8res--FR9310020--lles-d'Hy%C3%A8r](http://www.side.developpement-durable.gouv.fr/EXPLOITATION/DEFAULT/doc/IFD/IFD_REFDOC_0509831/Document-d'objectifs-(DOCOB)-sites-Natura-2000-FR9301613-Rade-d'Hy%C3%A8res--FR9310020--lles-d'Hy%C3%A8r).
- ESRI. « ArcGIS Desktop: Release 10 ». Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute., 2011.
- Finlayson, C. M, Rebecca D'Cruz, Nick Davidson, Millennium Ecosystem Assessment (Program), et World Resources Institute. *Ecosystems and Human Well-Being: Wetlands and Water: Synthesis*. Washington, D.C.: World Resources Institute, 2005.
- Frost, T. M., S. R. Carpenter, A. R. Ives, and T. K. Kratz. « Species compensation and complementarity in ecosystem function ». Chapman and Hall, New York, New York, USA, 1995.
- Galbraith, H, R Jones, R Park, J Clough, S Herrod-Julius, B Harrington, et G Page. « Global Climate Change and Sea Level Rise: Potential Losses of Intertidal Habitat for Shorebirds ». *WATERBIRDS* 25, n° 2 (juin 2002): 173-83. doi:10.1675/1524-4695(2002)025[0173:GCCASL]2.0.CO;2.
- « Gelman, A., Carlin, J. B., Stern, H. S., and D. B. Rubin (2003) Bayesian Data Analysis, 2nd edition. », s. d.
- Gelman, Andrew, et Jennifer Hill. *Data Analysis Using Regression and Multilevel/Hierarchical Models*. 11. printing. Analytical Methods for Social Research. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2009.
- Gimond-Lanteri, Frédérique, et Yann Corbobesse. « Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar (FDR)- version 2006-2008 : Les Salins d'Hyères », 2008.
- Gómez-Serrano, Miguel Ángel, et Pascual López-López. « Nest Site Selection by Kentish Plover Suggests a Trade-Off between Nest-Crypsis and Predator Detection Strategies ». Édité par Daniel Osorio. *PLoS ONE* 9, n° 9 (10 septembre 2014): e107121. doi:10.1371/journal.pone.0107121.
- Groupe d'évaluation scientifique et technique (GEST) Ramsar. « Note d'information Ramsar No 7 État des zones humides du monde et des services qu'elles fournissent à l'humanité : compilation d'analyses récentes », juin 2015. http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/cop12_doc23_bn7_sowws_f.pdf.
- Gutierrez, J. S., J. A. Masero, J. M. Abad-Gomez, A. Villegas, et J. M. Sanchez-Guzman. « Understanding the Energetic Costs of Living in Saline Environments: Effects of Salinity on Basal Metabolic Rate, Body Mass and Daily Energy Consumption of a Long-Distance Migratory Shorebird ». *Journal of Experimental Biology* 214, n° 5 (1 mars 2011): 829-35. doi:10.1242/jeb.048223.
- Gutiérrez, Jorge S., Andrea Soriano-Redondo, Anne Dekinga, Auxiliadora Villegas, José A. Masero, et Theunis Piersma. « How Salinity and Temperature Combine to Affect Physiological

- State and Performance in Red Knots with Contrasting Non-Breeding Environments ». *Oecologia* 178, n° 4 (août 2015): 1077-91. doi:10.1007/s00442-015-3308-4.
- Helmers, Douglas L. *Shorebird Management Manual*. Western Hemisphere Shorebird Reserve Network, Manomet, 1992. http://www.lmvjv.org/library/shorebird_management_manual_1992.pdf.
- Hernandorena, A. « Effets of Salinity on Nutritional Requirements of *Artemia Salina* ». *The Biological Bulletin* 146, n° 2 (avril 1974): 238-48. doi:10.2307/1540620.
- International Wader Study Group, Site Internet de l'International Wader Study Group, 2017. <http://www.waderstudygroup.org/>.
- Kery, Marc, et J. Andrew Royle. *Applied Hierarchical Modeling in Ecology. Analysis of Distribution, Abundance and Species Richness in R and BUGS Volume 1. Volume 1*. Amsterdam: Academic Press, 2016.
- Larsson, Hans, et Klaus Mallig Olsen. *Gulls of Europe, Asia and North America*. Helm Identification Guides, 2010.
- Lascève M., Crocq C., Kabouche B., Flitti A. & Dhermain F. « Oiseaux remarquables de Provence. Ecologie, statut et conservation ». LPO PACA, CEEP, DIREN PACA, Région PACA. Delachaux et Niestlé, 2006.
- Leandro Bugoni, Thomas D. Cormons, Andrew W. Boyne and Helen Hays. « Feeding Grounds, Daily Foraging Activities, and Movements of Common Terns in Southern Brazil, Determined by Radio-Telemetry », décembre 2015, *Waterbirds: The International Journal of Waterbird Biology* Vol. 28, No. 4 édition.
- LERM. « Site internet du LERM », 2015. <http://doc.lerm.fr/salinite-leau-mer/>.
- Life+ ENVOLL. « Networking nesting habitats along the French Mediterranean coastline for the Conservation of Colonial Charadriiformes, LIFE12 NAT/FR/000538 », 2012. http://www.life-envoll.eu/IMG/pdf/technica_application_form_part_a.pdf.
- LPO PACA. « Bilan ornithologique des Salins d'Hyères pour l'année 2014 ». LPO PACA/TPM. Faune-PACA Publication n°51, 80 pp., 2015.
- Luís, António, et John Goss-Custard. « Spatial Organization of the Dunlin *Calidris alpina* L. during Winter – the Existence of Functional Units ». *Bird Study* 52, n° 2 (juillet 2005): 97-103. doi:10.1080/00063650509461379.
- Malatric, Yves. *Le commerce du sel d'Hyères en Ligurie du XIIIe au XVe siècle*. Univ. aix, 1964.
- Masero, José A. « Assessing alternative anthropogenic habitats for conserving waterbirds: salinas as buffer areas against the impact of natural habitat loss for shorebirds ». *Biodiversity & Conservation* 12, n° 6 (1 juin 2003): 1157-73. doi:10.1023/A:1023021320448.
- Medeiros, Renata, Jaime A. Ramos, Vítor H. Paiva, Ana Almeida, Patrícia Pedro, et Sandra Antunes. « Signage Reduces the Impact of Human Disturbance on Little Tern Nesting Success in Portugal ». *Biological Conservation* 135, n° 1 (février 2007): 99-106. doi:10.1016/j.biocon.2006.10.001.
- Munns, R. « Comparative Physiology of Salt and Water Stress ». *Plant, Cell and Environment* 25, n° 2 (février 2002): 239-50. doi:10.1046/j.0016-8025.2001.00808.x.

- Noble, Virginie, et Henri Michaud. « Cartographie de la végétation et des habitats naturels du site Natura 2000 « Rade d'Hyères » FR9301613 Actualisation des cartographies pour l'île du Levant, Vieux-Salins, Salin des Pesquiers et tombolo de Giens, îlots de la rade ». Conservatoire Botanique National Méditerranéen, avril 2016.
- Norazlimi, Nor Atiqah, et Rosli Ramli. « The Relationships between Morphological Characteristics and Foraging Behavior in Four Selected Species of Shorebirds and Water Birds Utilizing Tropical Mudflats ». *The Scientific World Journal* 2015 (2015): 1-7. doi:10.1155/2015/105296.
- Olea, Pedro P. « Analysing Spatial and Temporal Variation in Colony Size: An Approach Using Autoregressive Mixed Models and Information Theory ». *Population Ecology* 51, n° 1 (janvier 2009): 161-74. doi:10.1007/s10144-008-0106-4.
- Paiva, Vitor H., Jaime A. Ramos, Jorge Martins, Ana Almeida, et Ana Carvalho. « Foraging Habitat Selection by Little Terns *Sterna albifrons* in an Estuarine Lagoon System of Southern Portugal: Foraging Habitat Selection by Little Terns ». *Ibis* 150, n° 1 (7 juin 2007): 18-31. doi:10.1111/j.1474-919X.2007.00722.x.
- Parlement européen. « Directive 2009/147/CE », 30 novembre 2009. https://inpn.mnhn.fr/docs/natura2000/Directive_oiseaux_version_2009.pdf.
- Plummer, Martyn. « JAGS: A Program for Analysis of Bayesian Graphical Models Using Gibbs Sampling », 2003. <https://www.r-project.org/conferences/DSC-2003/Proceedings/Plummer.pdf>.
- PNPC. « Stratégie scientifique 2013-2022 du parc National de Port-Cros », mars 2013.
- PNPC et CEFE. « Convention de stage », 2017.
- R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>. », s. d.
- Rocamora G, et Yeatman-Berthelot D. « Oiseaux menacés et à surveiller en France. Listes rouges et recherche de priorités. Populations. Tendances. Menaces ». 1999, Conservation. SEOF/LPO édition.
- Rocha, Afonso Duarte dos Reis, Ramos, Jaime Osório, José Masero. « Living in human created habitats: the ecology and conservation of waders on salinas ». ACAAP, 2016.
- Rowell-Garvon, Shannon R., et Kim Withers. « Behavior and Habitat Use by Shorebirds in an Urban Wetland Complex along the Central Gulf Coast of Texas ». *The Southwestern Naturalist* 54, n° 2 (mai 2009): 127-35. doi:10.1894/MH-15.1.
- Rubin. « Gelman, A. et D. B. Rubin (1992) Inference from iterative simulation using multiple sequences (with discussion). *Statistical Science*, 7:457-511 », s. d.
- Saintilan, Neil, et Kerry Lee Rogers. « Coastal saltmarsh vulnerability to climate change in SE Australia », 2015, NSW Department of Environment Climate Change and Water édition.
- Sanz-Aguilar, Ana, Giacomo Tavecchia, Isabel Afán, Francisco Ramírez, Aggeliki Doxa, Albert Bertolero, Carlos Gutiérrez-Expósito, Manuela G. Forero, et Daniel Oro. « Living on the Edge: Demography of the Slender-Billed Gull in the Western Mediterranean ». Édité par Sébastien Descamps. *PLoS ONE* 9, n° 3 (24 mars 2014): e92674. doi:10.1371/journal.pone.0092674.

- Smit, C.J. et Visser, G.J.M. « Effects of disturbance on shorebirds: a summary of existing knowledge from the Dutch Wadden Sea and Delta area », 1993, Wader Study Group Bull. 68: 6-19. édition.
- « Sterne naine, *Sterna albifrons* - Cahiers d'Habitat « Oiseaux » - MEEDDAT- MNHN », 2015. <https://inpn.mnhn.fr/docs/cahab/fiches/Sterne-naine.pdf>.
- Tour du Valat. « MWO Report - Land Cover: Spatial dynamics in Mediterranean coastal wetlands from 1975 to 2005 ». Mediterranean Wetlands Observatory, 2014.
- TPM. « - Suivi ornithologique des salins d'Hyères– Année 2016 - Cahier des charges », 2016.
- « Les Salins d'Hyères : Rapport d'activités Années 2014 & 2015 », mars 2016.
- Site de la Communauté d'Agglomération Toulon Provence Méditerranée , 2017. <https://tpm-agglo.fr/tpm/article/territoire-de-toulon-provence-mediterranee>.
- Vicente, Julien. *Avifaune nicheuse des salins : Cartographie des sites de reproduction*. PNPC. 07/2016, s. d. Cartographie réalisée dans le cadre de la mise à jour du Docob, en cours de réactualisation.
- Zuur, Alain F., éd. *Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R*. Statistics for Biology and Health. New York, NY: Springer, 2009.

63 références.

Annexes

Annexe 1 : Liste des contacts

TABLEAU 3 : TABLEAU DES CONTACTS

Prénom et NOM	Organisme	Fonction	Adresse e-mail
Jean-Yves BARNAGAUD	CEFE (CNRS) – EPHE	Chercheur, maître de conférences	jean- yves.barnagaud@cefe.cnrs.fr
David GEOFFROY	Parc National de Port-Cros	Référent faune terrestre	david.geoffroy@portcros- parcnational.fr
Matthieu LASCEVE	Toulon Provence Méditerranée	Chargé de mission	mlasceve@tpmed.org
Aurélien AUDEVARD	LPO PACA	Ornithologue	aurelien.audevard@lpo.fr
Frédérique GIMOND- LANTERI	Toulon Provence Méditerranée	Responsable du site des Salins d'Hyères	fgimondlanteri@tpmed.org

Annexe 2 : R-hat

TABLEAU 4: TABLEAU DES R-HAT POUR LES DIFFERENTS PARAMETRES DU MODELE

Paramètre	Espèce	r.hat
mubeta	Avocette élégante	0,999889127
mubeta	Échasse blanche	0,999918151
mubeta	Flamant rose	0,99988235
mubeta	Goéland railleur	0,999660073
mubeta	Gravelot à collier interrompu	1,001720366
mubeta	Mouette rieuse	0,999603845
mubeta	Sterne caugek	0,99958237
mubeta	Sterne naine	1,00027225
mubeta	Sterne pierregarin	1,000067008
mubeta2	Avocette élégante	0,999665978
mubeta2	Échasse blanche	0,999654773
mubeta2	Flamant rose	0,999753284
mubeta2	Goéland railleur	0,999581548
mubeta2	Gravelot à collier interrompu	0,99995982
mubeta2	Mouette rieuse	1,000700453
mubeta2	Sterne caugek	1,000148514
mubeta2	Sterne naine	0,999884653
mubeta2	Sterne pierregarin	0,999686418
mugamma	Avocette élégante	0,999504346
mugamma	Échasse blanche	0,999730345
mugamma	Flamant rose	1,000520261
mugamma	Goéland railleur	0,999777749
mugamma	Gravelot à collier interrompu	1,000075919
mugamma	Mouette rieuse	0,999786862
mugamma	Sterne caugek	0,999505124
mugamma	Sterne naine	0,999909773
mugamma	Sterne pierregarin	0,999614204
mugamma2	Avocette élégante	0,99969079
mugamma2	Échasse blanche	0,999778547
mugamma2	Flamant rose	0,999515544
mugamma2	Goéland railleur	0,999765512
mugamma2	Gravelot à collier interrompu	1,000161739
mugamma2	Mouette rieuse	0,999853847
mugamma2	Sterne caugek	0,999754724
mugamma2	Sterne naine	0,999979679
mugamma2	Sterne pierregarin	0,999696573
muomega	Avocette élégante	1,000563826
muomega	Échasse blanche	1,000315983
muomega	Flamant rose	1,000030207
muomega	Goéland railleur	1,002685951
muomega	Gravelot à collier interrompu	1,000043598
muomega	Mouette rieuse	1,000183858
muomega	Sterne caugek	1,000497851
muomega	Sterne naine	0,999868683
muomega	Sterne pierregarin	0,999870383
muomega2	Avocette élégante	1,00026221
muomega2	Échasse blanche	0,999810738
muomega2	Flamant rose	0,999943813
muomega2	Goéland railleur	0,999660685
muomega2	Gravelot à collier interrompu	1,000045254
muomega2	Mouette rieuse	0,999528085
muomega2	Sterne caugek	0,999766425
muomega2	Sterne naine	1,000784064
muomega2	Sterne pierregarin	1,001028169
mualpha	Avocette élégante	1,002919757

mualpha	Échasse blanche	0,999777554
mualpha	Flamant rose	1,012206862
mualpha	Goéland railleur	1,024177971
mualpha	Gravelot à collier interrompu	1,000272329
mualpha	Mouette rieuse	1,00046849
mualpha	Sterne caugek	1,001177123
mualpha	Sterne naine	0,999699751
mualpha	Sterne pierregarin	1,002289547
mualpha	Avocette élégante	1,002919757
mualpha	Échasse blanche	0,999777554
mualpha	Flamant rose	1,012206862
mualpha	Goéland railleur	1,024177971
mualpha	Gravelot à collier interrompu	1,000272329
mualpha	Mouette rieuse	1,00046849
mualpha	Sterne caugek	1,001177123
mualpha	Sterne naine	0,999699751
mualpha	Sterne pierregarin	1,002289547
tau j		0,9996679
tau y		0,9999582
psi	Avocette élégante	1,007045479
psi	Échasse blanche	1,006406593
psi	Flamant rose	0,999820257
psi	Goéland railleur	1,000132678
psi	Gravelot à collier interrompu	1,000270384
psi	Mouette rieuse	1,000620338
psi	Sterne caugek	0,999587729
psi	Sterne naine	0,999791836
psi	Sterne pierregarin	0,999556271
psi	Avocette élégante	1,006965446
psi	Échasse blanche	1,00091602
psi	Flamant rose	1,003683438
psi	Goéland railleur	1,001599403
psi	Gravelot à collier interrompu	0,999657243
psi	Mouette rieuse	1,000658424
psi	Sterne caugek	1,00044152
psi	Sterne naine	1,000864819
psi	Sterne pierregarin	1,000305136

Annexe 3 : méthodologie pour la partie « Composition, Distribution et Evolution de l'avifaune sur les Salins. »

Composition des communautés avifaunistiques

Afin de déterminer la composition des communautés d'oiseaux sur chaque bassin, nous avons calculé les abondances relatives moyennes par comptage $pmoy(i,s)$ pour chaque espèce s et chaque bassin i .

$$pmoy(i,s) = moy_{t,k} (p(i,t,k,s)) \quad (1)$$

Où $p(i,t,k,s) = N(i,t,k,s) / \sum_s N(i,t,k,s)$ est la proportion du nombre total de Laro-limicoles représentée par l'espèce s sur le site i à la date t de l'année k et $N(i,t,k,s)$ est le nombre d'oiseaux de l'espèce s sur le site i à la date t de l'année k

Ceci nous permet de comparer les bassins entre eux. Les compositions sont représentées sous forme de diagrammes qui permettent facilement de visualiser les variations inter-sites.

Nous calculons ces mêmes abondances relatives moyennes mois par mois pour chaque site, afin de dégager les variations intra-annuelles de la composition pour chaque bassin.

Au mois m :

$$p(i,s,m) = moy_{t \in m} (N(i,t,k,s) / \sum_s N(i,t,k,s)) \quad (2)$$

Nous avons calculé différents indices écologiques dérivés des données brutes :

- Nombre total de Laro-limicoles sur le site i à la date t de l'année k :

$$N(i,t,k) = \sum_s N(i,t,k,s) \quad (3)$$

Ceci permet d'évaluer la capacité d'accueil en limicoles du site i , et de la comparer à d'autres sites qui attirent plus ou moins d'oiseaux.

- Richesse spécifique sur le site i à la date t de l'année k :

$$S(i,t,k) = \sum_s \mathbb{1}(i,t,k,s) \quad (4)$$

Où $\mathbb{1}(i,t,k,s) = 1$ si l'espèce s est présente sur le site i à la date t et $\mathbb{1}(i,t,k,s) = 0$ sinon

Cet indice simple constitue un premier estimateur de la diversité avifaunistique rencontrée sur chaque site.

- Equitabilité sur le site i à la date t de l'année k (à partir de l'indice de diversité de Shannon) :

$$H(i,t,k) = (\sum_s \log(p(i,t,k,s)) * p(i,t,k,s)) / \log(\sum_s \mathbb{1}(i,t,k,s)) \quad (5)$$

Cet indice permet d'évaluer la qualité de la distribution du nombre d'oiseaux de chaque espèce sur un site. Une distribution est équitable lorsqu'il y a autant d'oiseaux de toutes les espèces. Au contraire, une mauvaise équitabilité met en évidence des sites dominés par une seule ou peu d'espèces.

- Le quotient des variances (Variance Ratio) sur le site i , qui nous permet de comprendre comment les espèces interagissent entre elles :

$$VR(i) = (Var(\sum_{t,k} S(i, t, k)) / \sum_{t,k} Var(S(i, t, k))) \quad (6)$$

Cet indice est un estimateur de la synchronie des variations d'effectifs des différentes espèces. Il traduit l'existence de mécanismes de compétitions pour les ressources entre les différentes espèces (Frost et al., 1995).

- Lorsque $VR(k) > 1$, les espèces varient en synchronie. C'est-à-dire que lorsque les effectifs d'une espèce diminuent, les autres espèces diminuent aussi. Ce phénomène est en général associé à la présence de ressources non limitantes (exemple : surface de vasières), dont toutes les espèces peuvent bénéficier sans saturer son exploitation. Lorsque la qualité des ressources s'améliore, le site devient plus attractif pour toutes les espèces et le nombre d'oiseaux augmente pour toutes les espèces.
- Lorsque $VR(k) < 1$, les espèces varient en compensation. C'est-à-dire que lorsque les effectifs d'une espèce diminuent, les autres espèces augmentent. Ce phénomène est en général associé à la présence d'une ressource limitante (exemple : îlots de nidification), pour laquelle les espèces sont en compétition.

Distribution spatiales

Nous avons produit les cartes de distribution (par classes d'abondances) de chacune des 9 espèces cibles à l'aide du logiciel ArcGIS (ESRI, 2011), ainsi que les cartes des différents indices présentés au paragraphe précédent.

Tendances

Afin de connaître l'évolution des populations des différentes espèces présentes sur les salins pour chaque espèce et pour chaque site (Pesquiers, Vieux Salins), nous avons modélisé l'abondance en fonction de l'année à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2016).

Nous avons adopté :

- 1) Un modèle mixte additif généralisé de Poisson avec une structure d'autocorrélation temporelle d'ordre un selon le jour de l'année pour chaque année de la période d'étude (Zuur, 2009).
- 2) Un modèle linéaire généralisé de Poisson avec une structure d'autocorrélation temporelle d'ordre un selon le jour de l'année pour chaque année de la période d'étude (Zuur, 2009).

Afin d'évaluer la tendance générale sur la période 2009-2016, les pentes issues de ce deuxième modèle ont été extraites pour chaque espèce, ainsi que les intervalles de confiance correspondants. Nous avons également procédé à la même analyse sur les périodes 2009-2012 et 2013-2016.

Annexe 4 : Composition des communautés avifaunistiques : résultats

4.1 Composition générale de l'avifaune des deux sites

Les graphes d'évolution temporelle de la composition des communautés avifaunistiques sur les salins montrent une saisonnalité marquée par deux phénomènes (Fig. 17 et 18) :

- Un remplacement des nicheurs (Avocettes, Echasses, Sternes...) par les Anatidés, Grèbes et Grands cormorans de septembre à mars.
- Une fluctuation du nombre d'oiseaux fortement associée aux variations d'abondance de Mouettes rieuses, Goélands leucophées et Flamants roses, qui représentent de 30% (mai) à 70% (septembre) des oiseaux des salins.

Sur les Vieux Salins, les Anatidés représentent jusqu'à un quart des oiseaux hivernants, tandis que cette proportion reste plus modeste sur les Pesquiers (<15%)

Le nombre total d'oiseaux sur les salins atteint deux maxima :

- en juillet et août (après l'éclosion des oeufs des espèces nicheuses sur les salins, l'effectif étant renforcé par les juvéniles).
- en janvier et décembre, alors que tous les oiseaux hivernants sur le site sont sur leurs quartiers d'hivernage.

Il est intéressant de noter que si la diversité est maximale en période de migration, le nombre d'oiseaux y est minimal. Cet effet est essentiellement dû au faible nombre de Laridés (mouettes rieuses et goélands leucophée) lors du passage pré-nuptial. Le départ de la plupart des oiseaux nicheurs à partir du mois de septembre, à une période où les anatidés et Bécasseaux hivernants ne sont pas encore arrivés explique le nombre d'oiseaux relativement plus faible en automne.

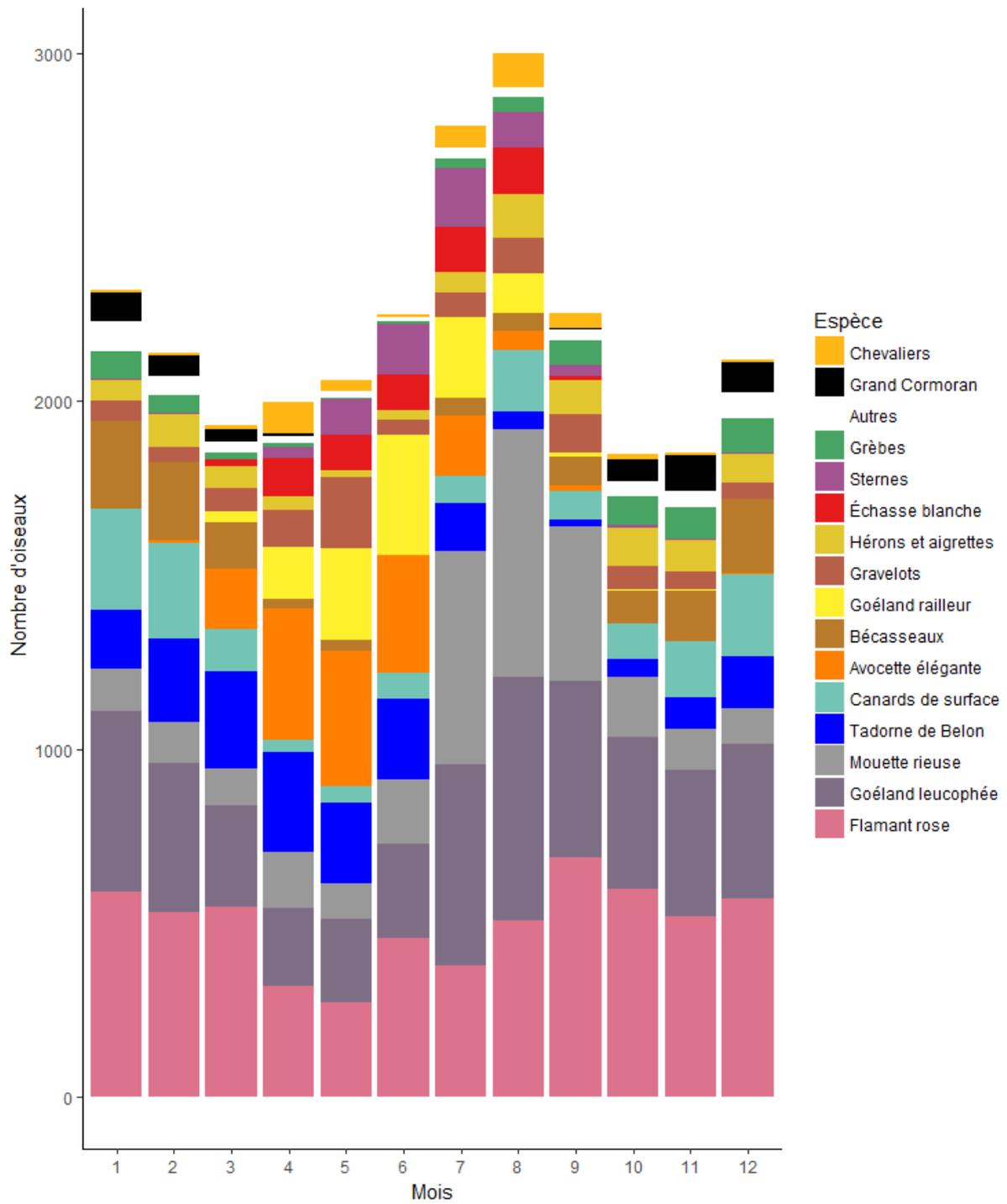


FIGURE 17: COMPOSITION MOYENNE DE L'AVIFAUNE DU SALIN DES PESQUIERS MOIS PAR MOIS.

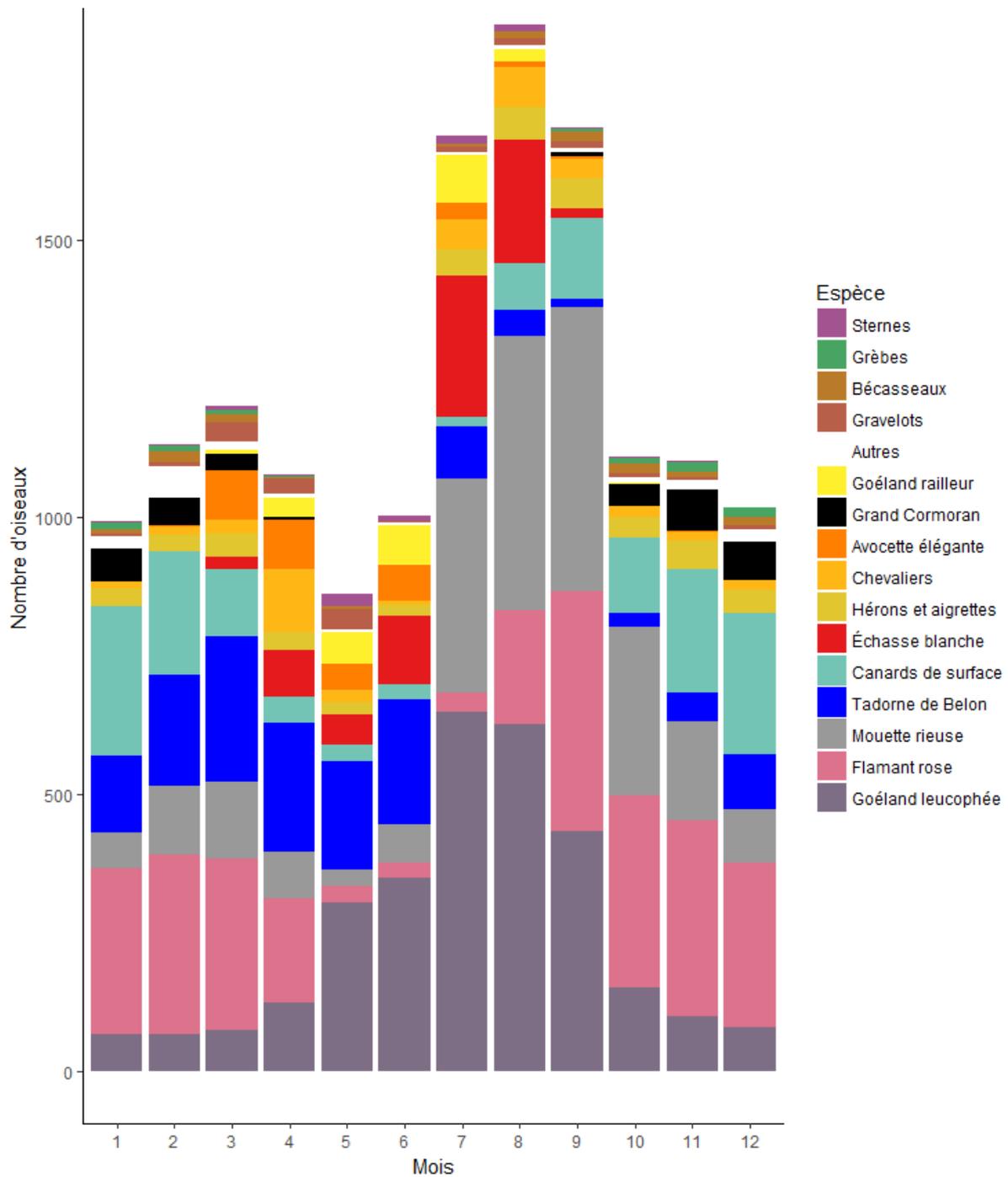


FIGURE 18 : COMPOSITION MOYENNE DE L'AVIFAUNE DU SALIN DES PESQUIERS MOIS PAR MOIS.

4.2 Compositions bassins par bassins

La composition de l'avifaune varie fortement entre les différents bassins (Fig. 19 à 22), tant en termes de quantité (de 15 à 500 oiseaux en moyenne selon les bassins) qu'en termes de composition. Si certains bassins sont dominés par une espèce (le Flamant rose sur l'Étang Sud des Pesquiers – bassin K), d'autres présentent une répartition plus équilibrée des différentes espèces et groupes d'oiseaux, comme les partènements de la Capte (bassin J). L'étang Nord (bassin I) diffère nettement des autres bassins des Pesquiers, par son attractivité pour les espèces affectionnant les eaux plus profondes. Les Grèbes, Anatidés (Canards de surface) et Cormorans y représentent ainsi jusqu'à 70% des oiseaux observés en hiver. De même, les bassins de la Remise (bassin 7) apparaissent comme un site majeur pour l'hivernage des Canards de surface, lorsque ceux-ci sont en eau.

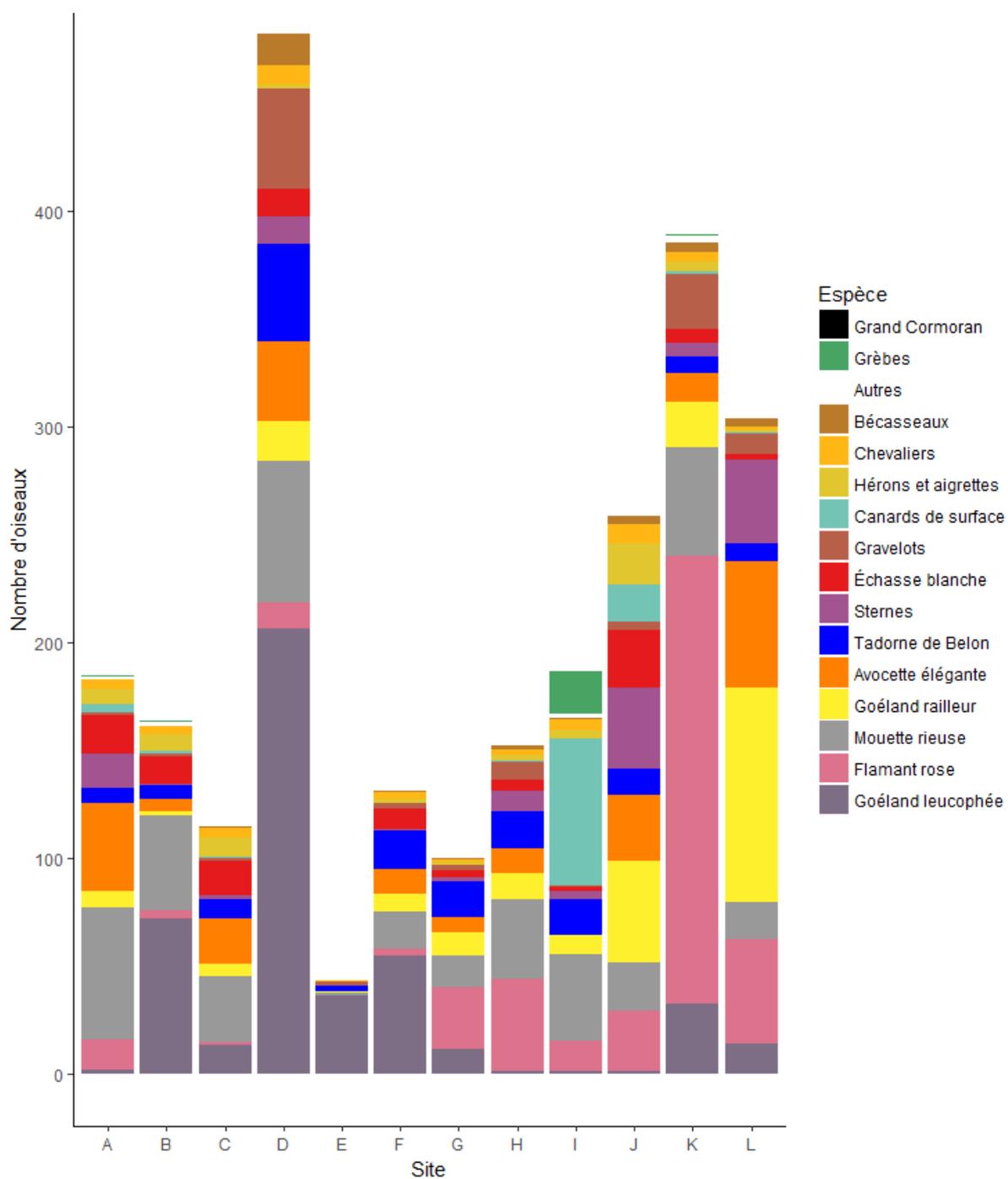


FIGURE 19: COMPOSITION DES COMMUNAUTÉS AVIFAUNISTIQUES BASSIN PAR BASSIN SUR LE SALIN DES PESQUIERS EN ETE

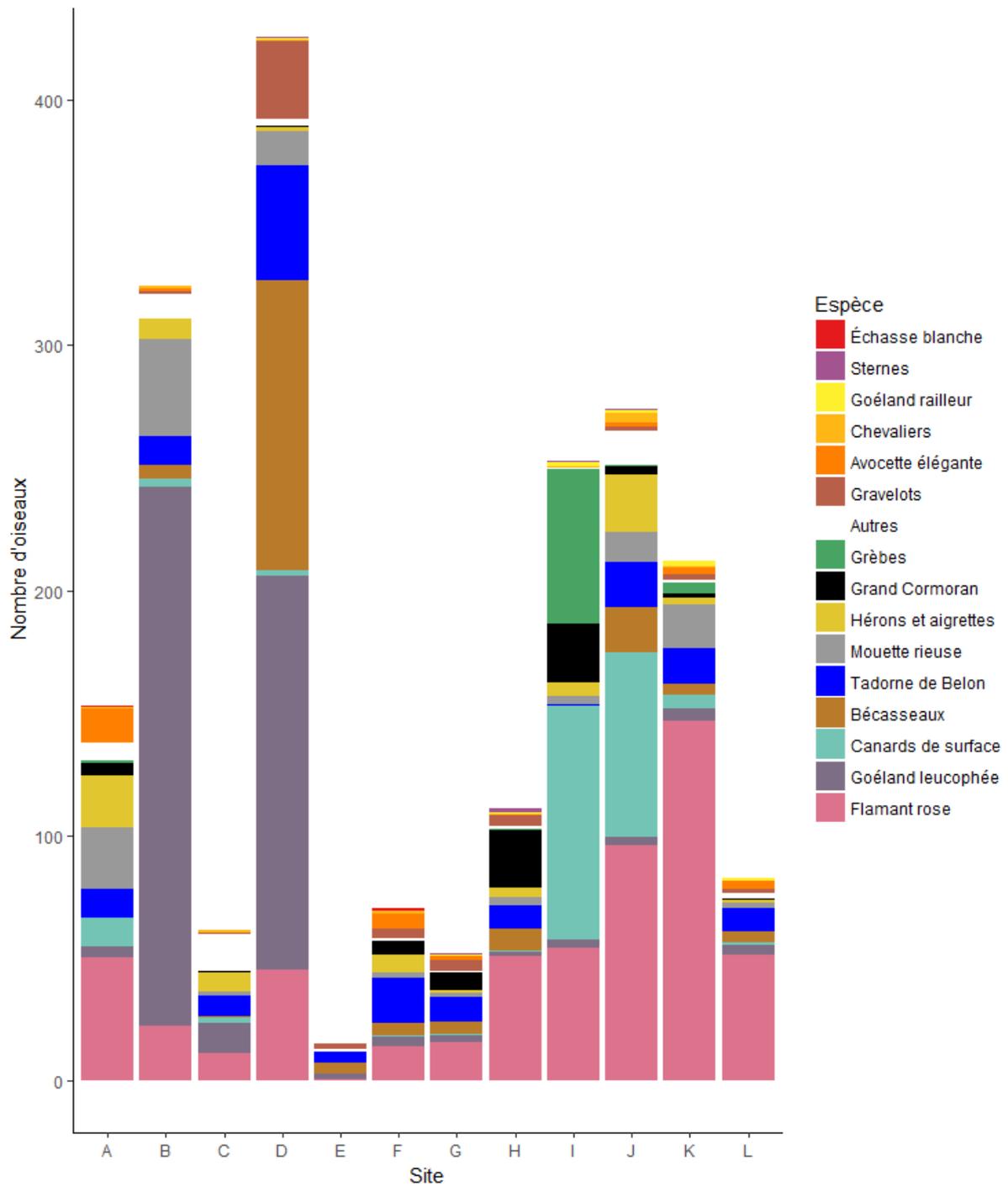


FIGURE 20 : COMPOSITION DES COMMUNAUTÉS AVIFAUNISTIQUES BASSIN PAR BASSIN SUR LE SALIN DES PESQUIERS EN HIVER

Composition des communautés avifaunistiques sur les Vieux Salins en Ete

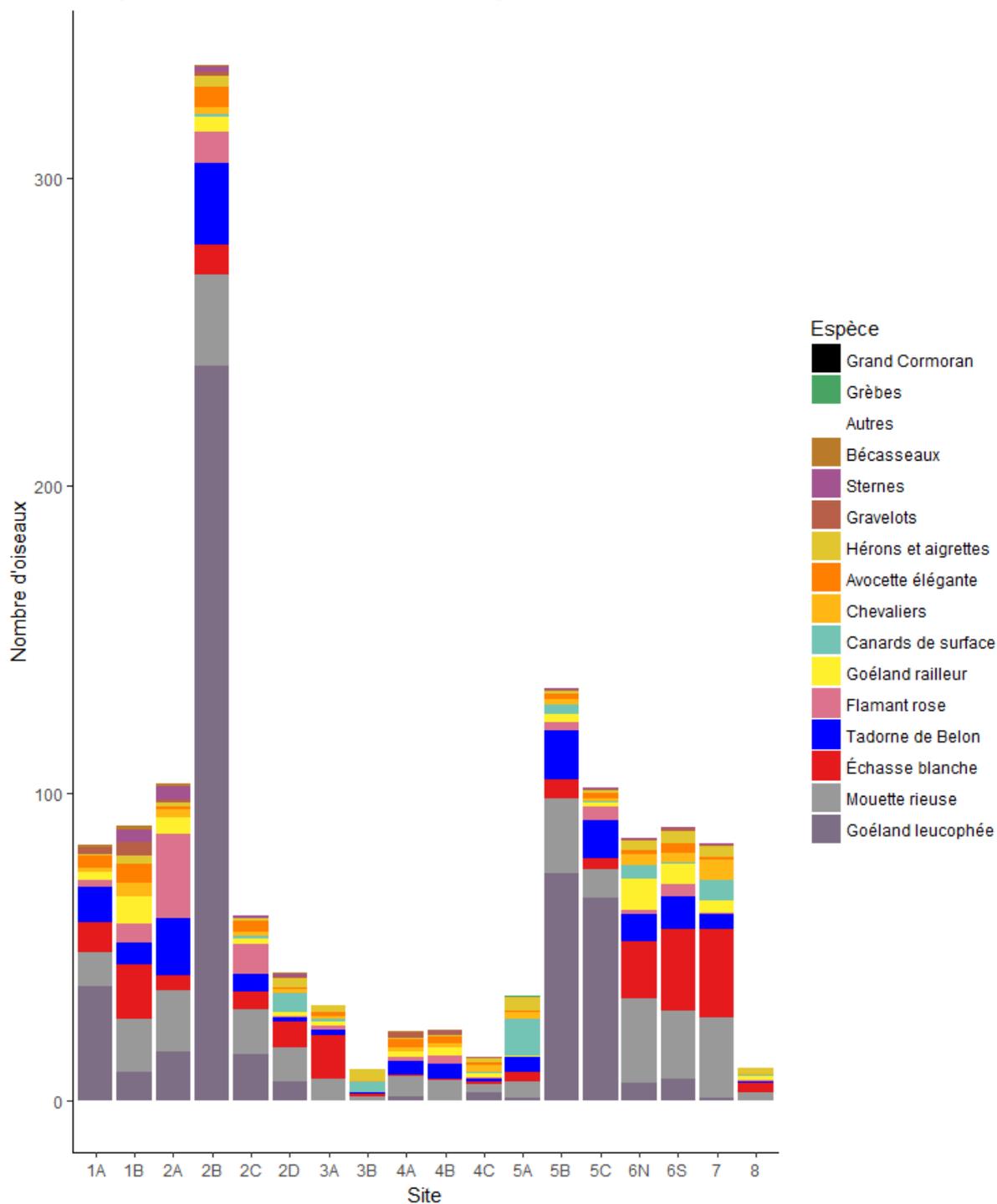


FIGURE 21: COMPOSITION DES COMMUNAUTES AVIFAUNISTIQUES BASSIN PAR BASSIN SUR LES VIEUX SALINS EN ETE

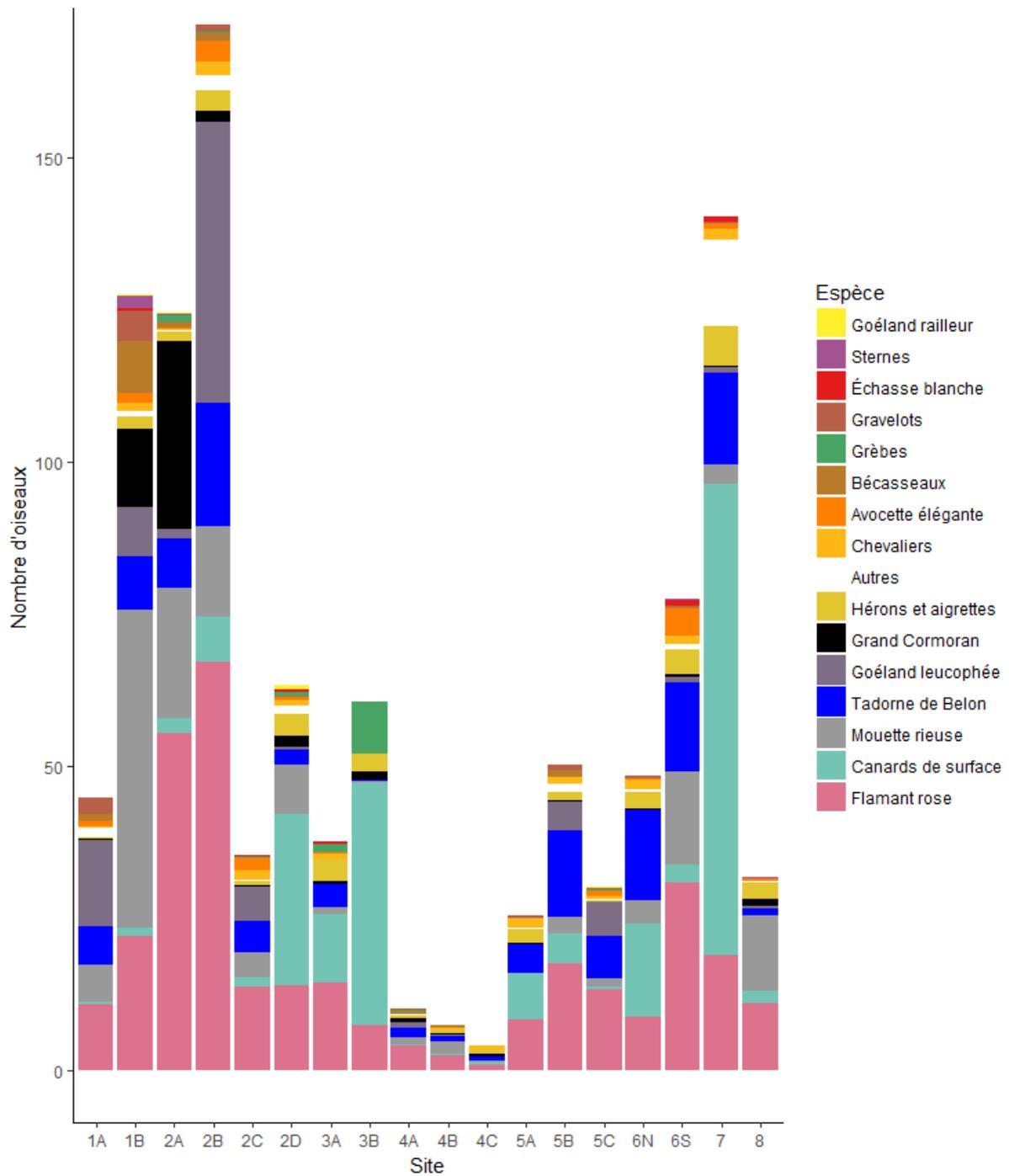


FIGURE 22: COMPOSITION DES COMMUNAUTES AVIFAUNISTIQUES BASSIN PAR BASSIN SUR LES VIEUX SALINS EN HIVER

Annexe 5 : Distribution spatiale des différentes espèces de Laro-limicoles présentes sur les salins

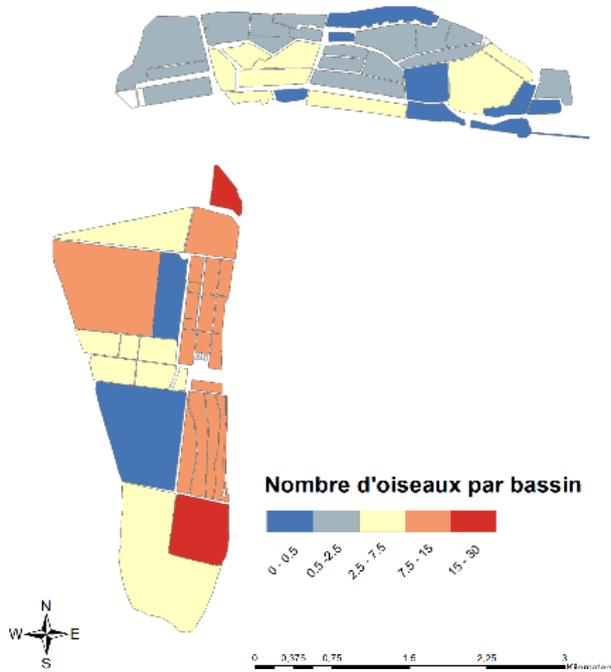
Les cartes de distribution espèce par espèce montrent l'utilisation des différents bassins par les espèces nichant, hivernant ou stationnant sur les salins une partie de l'année (Fig.23). Ces cartes sont notamment à comparer aux cartes d'attractivités (Fig.9), qui estiment les abondances dans un scénario virtuel où tous les bassins seraient gérés de la même manière.

Nom du bassin	Numéro	Commentaire
Marais de Redon	A	Site majeur pour l'Avocette élégante, l'Echasse blanche et la Mouette rieuse (respectivement 33,19 et 62 individus en moyenne). C'est également un bon site pour les Sternes pierregarin et naine. Ce bassin accueille peu de Gravelots, Bécasseaux ou Goélands leucophées (Fig.23).
Partètements extérieurs Ouest	B	Site accueillant de nombreuses Mouettes rieuses et Goélands leucophées en alimentation ou au repos (resp. 42 et 149 individus en moyenne), mais peu de Sternes (Fig.23).
Partètements extérieurs Est	C	Site relativement vide en oiseau par rapport au reste du salin des Pesquiers, il accueille tout de même quelques Avocettes élégantes et Echasses blanches, avec en moyenne 9 et 6 individus (Fig.23).
Etang neuf	D	Site majeur pour les Limicoles et les Laridés, ainsi que le Tadorne de belon. C'est le bassin qui accueille le plus d'oiseaux sur l'ensemble des salins d'Hyères (environ 500 oiseaux toutes espèces confondues). Il est relativement moins bon pour l'Echasse blanche et les Anatidés (Fig.23).
Partètements intérieurs Est	E	Il s'agit significativement du bassin le plus pauvre du salin des Pesquiers, qui accueille une vingtaine d'oiseaux en moyenne, essentiellement des Goélands leucophées et parfois quelques Bécasseaux (Fig.23).
Tables salantes	F	Ce site accueille principalement des Chevaliers et Tadornes de Belon. Il est peu exploité par les Sternes et les Flamants roses
Vieux bassins	G	Deuxième site le plus pauvre des Pesquiers, ces bassins accueillent environ 90 oiseaux en moyenne (Fig.23).
Nouveaux bassins	H	Ces bassins attirent surtout les Flamants roses (40 oiseaux en moyenne) et Goélands railleurs (Fig.23).
Etang Nord	I	L'Etang Nord est le principal bastion des Grèbes, Canards de surface et Grands cormorans sur les salins d'Hyères. Ces trois groupes représentent environ 200 oiseaux en hiver. Il n'est quasiment pas exploité par les limicoles mais attire quelques Flamants roses (Fig.23).
Partètements de la Capte	J	Principal site de nidification sur la zone d'étude, avec un intérêt majeur pour l'Avocette élégante, le Goéland railleur, les Sternes, l'Echasse blanche et le Flamant rose. Ce site attire également les Limicoles et Canards de surface en période de migration et constitue à ce titre le bassin le plus riche (en diversité) sur l'ensemble des salins d'Hyères (Fig.23).
Etang Sud	K	Site majeur pour le Flamant rose (180 oiseaux en moyenne), l'Etang Sud abrite des reposoirs de Goélands railleurs et Mouettes rieuses. Environ 400 oiseaux occupent ce bassin en été, ce qui en fait le deuxième meilleur bassin en nombre d'oiseaux. Il est

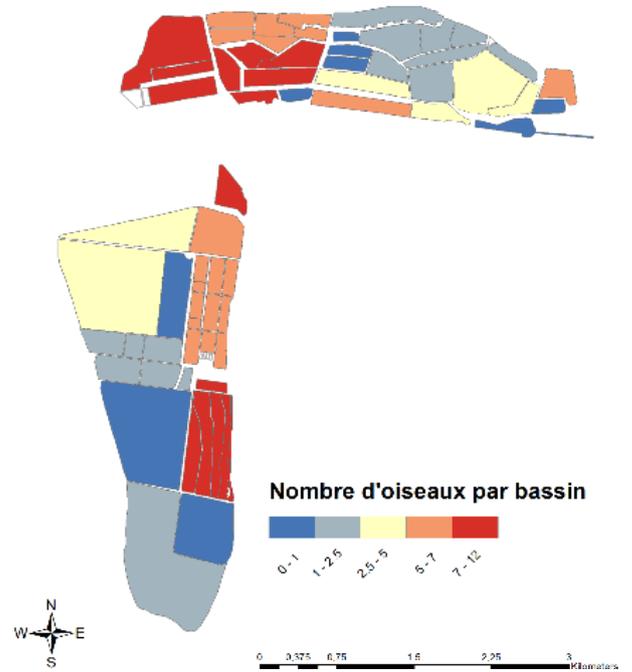
			relativement moins attractif que l'étang Nord et les Partènements de la Capte(bassins I et J) en été (Fig.23).
Partènements de Giens	L		Ce bassin est un site majeur pour le Flamant rose, les Sternes et l'Avocette élégante en été. Il attire relativement moins d'oiseaux en période de migration et en hiver. La diversité y est faible (Fig.23).
Quenet Nord	1N		Ce bassin accueille moins d'oiseaux que le Quenet Sud, surtout en période de migration, et est principalement exploité par le Goéland Leucopnée (Fig.23).
Quenet Sud	1S		Ce bassin est plus prisé par les oiseaux en hiver et en période de migration qu'en été. C'est le meilleur bassin pour la Mouette rieuse sur les Vieux Salins (Une quarantaine d'oiseaux en moyenne). Il attire quelques Echasses blanches et Chevaliers (Fig.23).
Bassin N°1	2A		Ce site accueille une dizaine de Grands cormorans, soit l'essentiel de l'effectif des Vieux Salins, ainsi qu'une cinquantaine de Flamants roses, ce qui en fait le bastion principal de l'espèce sur les Vieux Salins (Fig.23).
Bassin N°2 et 3	2B		Ce bassin est, de loin, le bassin le plus peuplé des Vieux Salins, avec en moyenne 320 oiseaux en été. Ceci est lié à la présence d'un reposoir de 125 Goélands leucopnées en moyenne, mais qui peut atteindre le millier d'individus. C'est également un site majeur pour le Flamant rose sur les Vieux Salins. Quelques Chevaliers y stationnent en période de migration (Fig.23).
La Rode et le Jas	2C		Ce bassins attire quelques Limicoles en période de migration (Fig.23).
Les Ournèdes	2D		Ce bassin attire peu d'oiseaux, mais sert principalement aux Canards de surface en hiver, avec une trentaine d'oiseaux (Fig.23).
Les Iletes et Peires	3N		Ce bassin, peu utilisé par les oiseaux attire toutefois l'Echasse blanche, et dans une moindre mesure le Flamant rose (Fig.23).
Etang de l'Anglais	3S		Ce bassin, désert en été (8 oiseaux en moyenne), accueille une cinquantaine de Canards de surfaces et Grèbes en hiver, ce qui en fait le meilleur site pour les espèces hivernantes affectionnant les eaux profondes sur les Vieux Salins.
Farnosi Sud, Farnosi Nord et Bassin du Grand Conseiller	4A, 4B et 4C		Les oiseaux fuient ces trois bassins à toute saison. Ces trois sites constituent les trois bassins les moins utilisés par les oiseaux sur l'ensemble des Salins d'Hyères, avec en moyenne 6-7 oiseaux par bassin, principalement des Mouettes rieuses ou Goélands leucopnées, et parfois quelques Flamants roses (Fig.23).
Les Terrasses	5A		Ce bassin, peu attractif, accueille quelques Canards de surface en hiver.
Conseillers - Joncs-Carré	5B		Ce bassin abrite principalement des Goélands leucopnées et Tadorne de Belon (Fig.23).
L'Estagnet	5C		Ce bassin est principalement utilisé comme reposoir par les Laridés (Fig.23).
La Mère - Matinières	6N		Ce site attire l'Echasse blanche ainsi que les Chevaliers en période de migration et les Canards de surface en hiver
St Nicolas - Olivâtre	6S		Site majeur pour l'Echasse blanche sur les Vieux Salins, il attire également des Flamants Roses et limicoles en période de migration (Fig.23).
La Remise - 7	7		Selon les niveaux d'eau, les bassins de La Remise peuvent constituer, de loin, le meilleur site pour les Canards de surface (80

Nourrice - 8	8	oiseaux en moyenne) sur les Vieux Salins. C'est également un excellent site pour les Limicoles (Chevaliers), ainsi que pour l'Echasse blanche (Fig.23). Ce bassin accueille du Goéland leucopnée et du Flamant rose en hiver (30 oiseaux). Il est déserté en été (7 oiseaux, toutes espèces confondues en moyenne) (Fig.23).
--------------	---	---

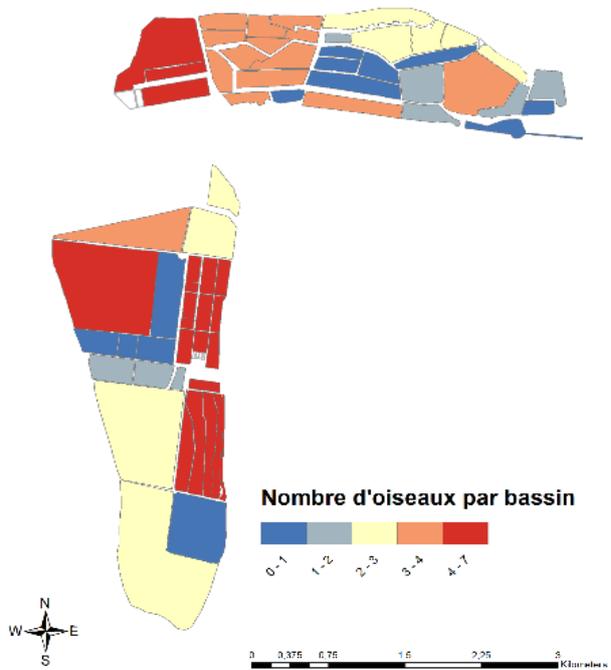
Effectifs moyens par bassin - Avocette élégante



Effectifs moyens par bassin - Echasse blanche



Effectifs moyens par bassin - Chevaliers



Effectifs moyens par bassin - Bécasseaux

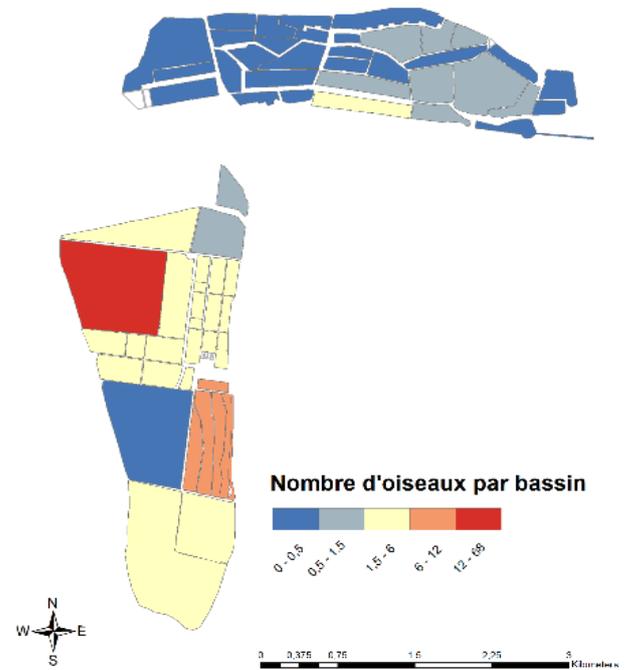
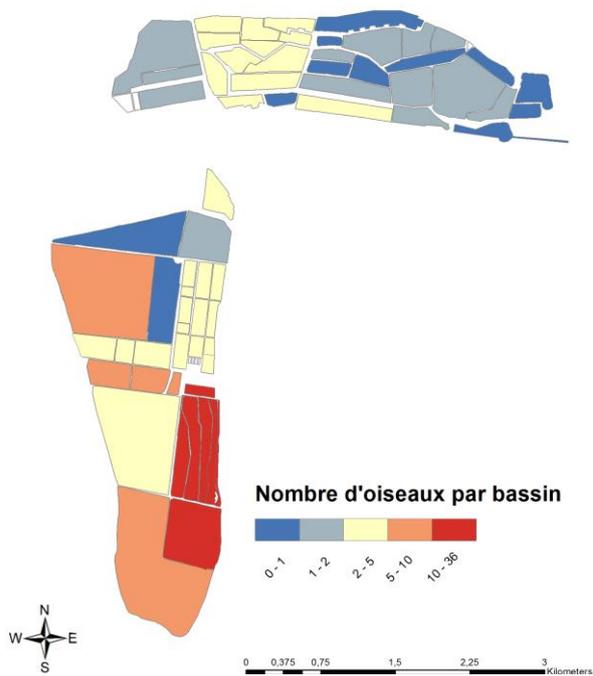
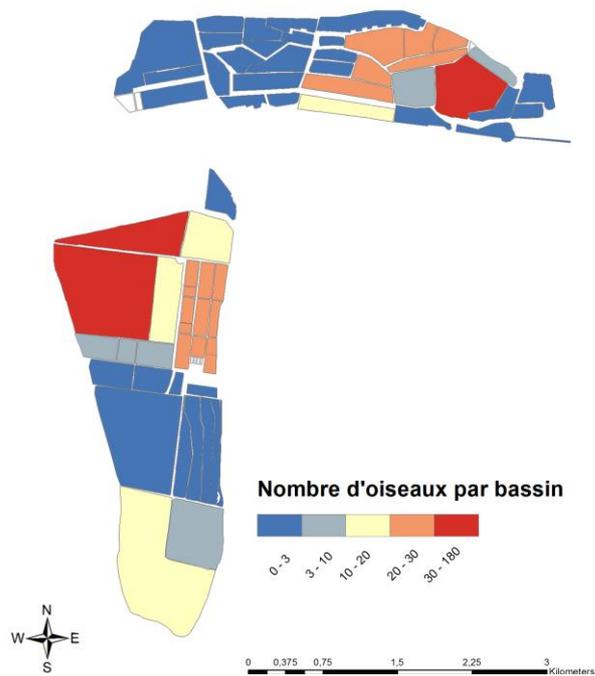


Figure 23 : Répartition des différentes espèces des salins

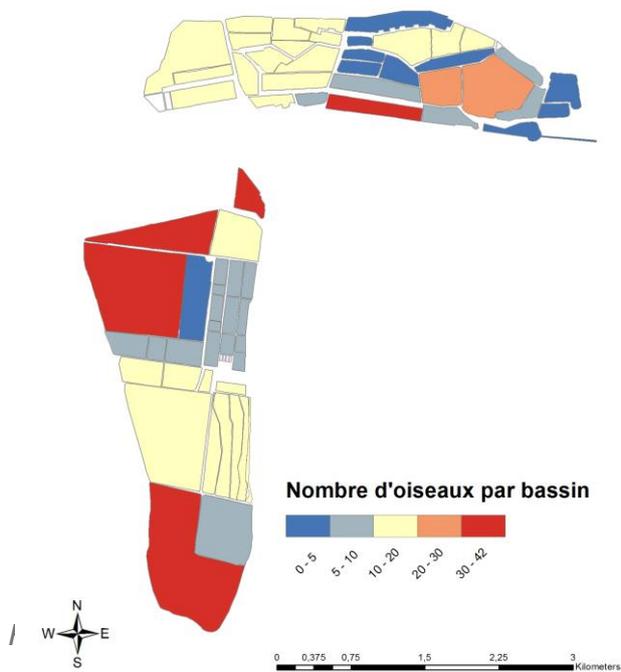
Effectifs moyens par bassin - Goéland railleur



Effectifs moyens par bassin - Goéland leucopnée



Effectifs moyens par bassin - Mouette rieuse



Effectifs moyens par bassin - Sternes

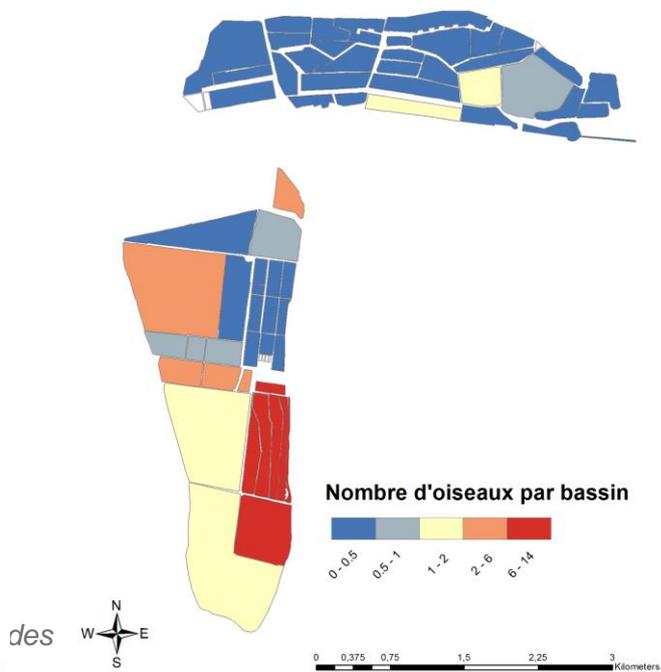
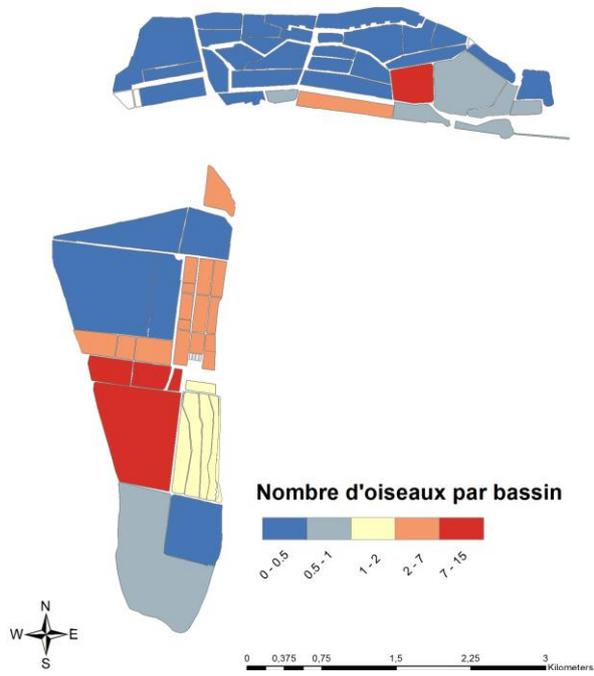
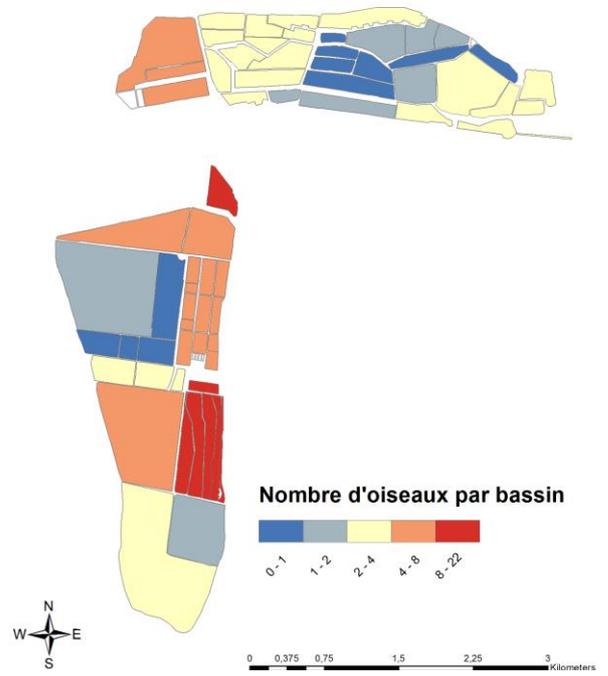


Figure 23 : Répartition des différentes espèces des salins

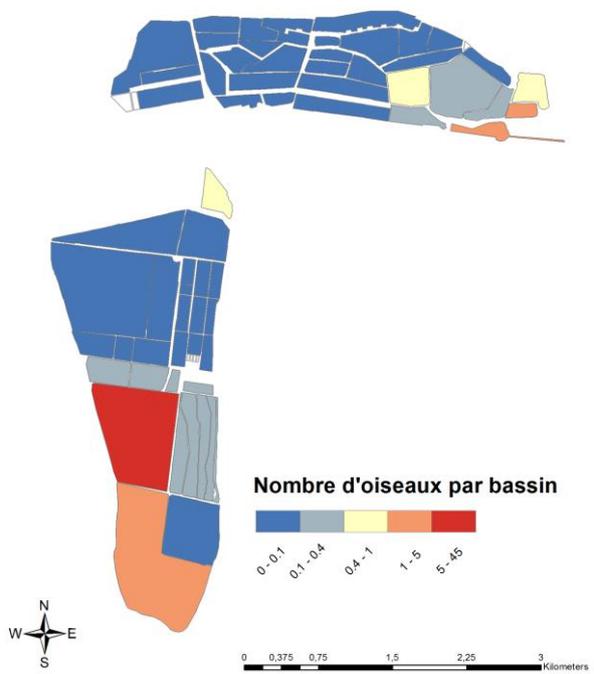
Effectifs moyens par bassin - Grand cormoran



Effectifs moyens par bassin - Hérons et aigrettes



Effectifs moyens par bassin - Grèbes



Effectifs moyens par bassin - Canards de surface

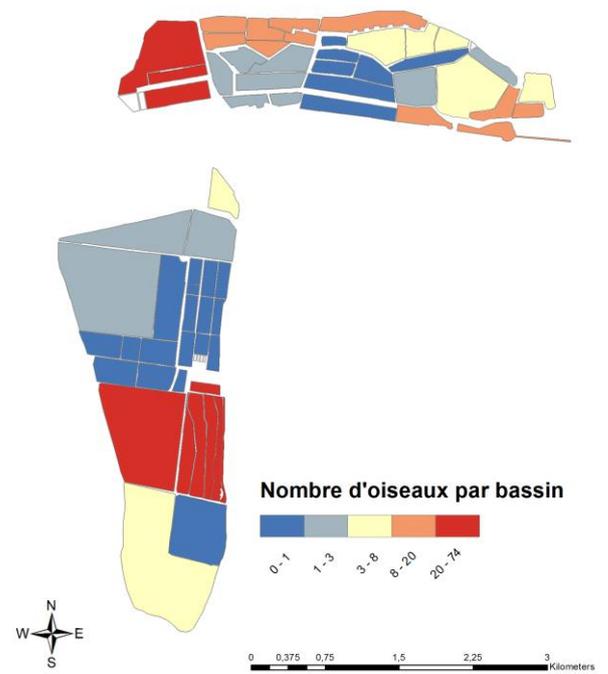
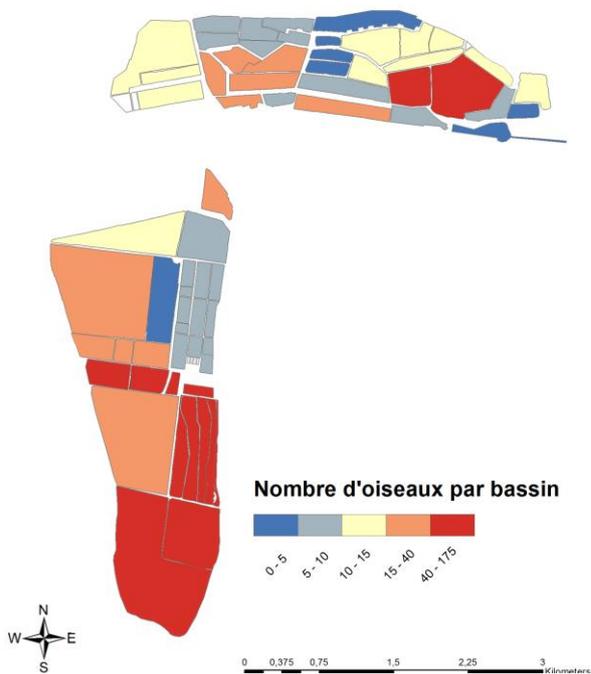
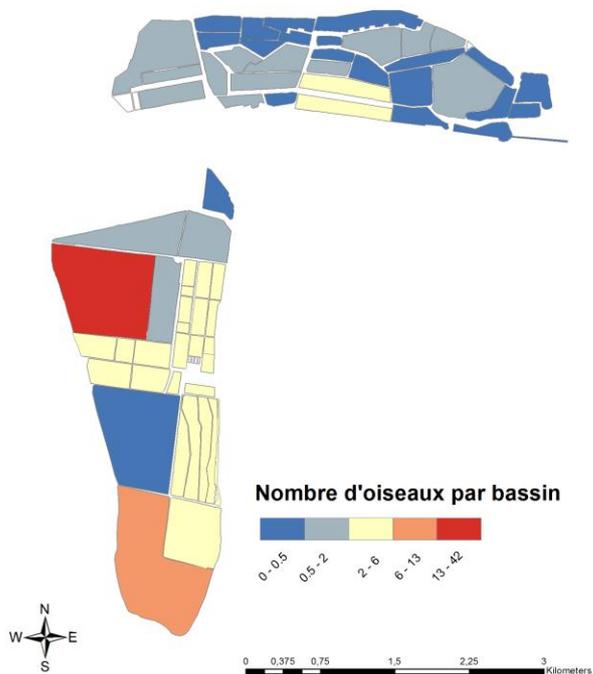


Figure 23 : Répartition des différentes espèces des salins

Effectifs moyens par bassin - Flamant rose



Effectifs moyens par bassin - Gravelots



Effectifs moyens par bassin - Tadorne de Belon

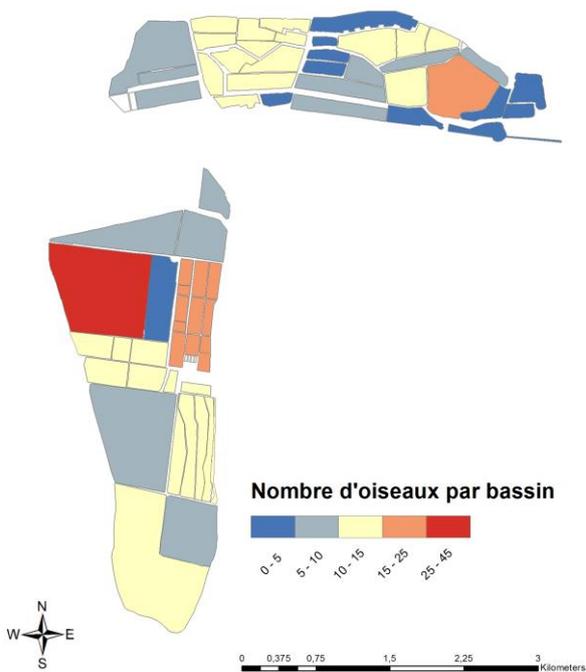


FIGURE 23: REPARTITION DES DIFFERENTES ESPECES DES SALINS

Annexe 6 : Evolution des populations de Laro-limicoles sur les dernières années

Les tendances montrent que les effectifs estimés de toutes les espèces de Laro-limicoles sont en hausse ou stables sur la période 2009-2016 sur les deux sites (Fig. 25 et 26), à l'exception du Gravelot à collier interrompu, qui connaît une baisse sur les Vieux Salins. Les effectifs du Goéland leucophée et de la Sterne caugek ont augmenté au cours de la période sur les deux sites.

Cependant, de fortes variations interannuelles existent (Fig. 24). En particulier, les effectifs du Gravelot à collier interrompu et du Goéland railleur ont diminué entre 2013 et 2016 sur le salin des Pesquiers, après une hausse entre 2009 et 2012 (Fig. 27 et 29). La population de Goélants leucophée a cessé d'augmenter à partir de 2012 (Fig. 27 à 31)

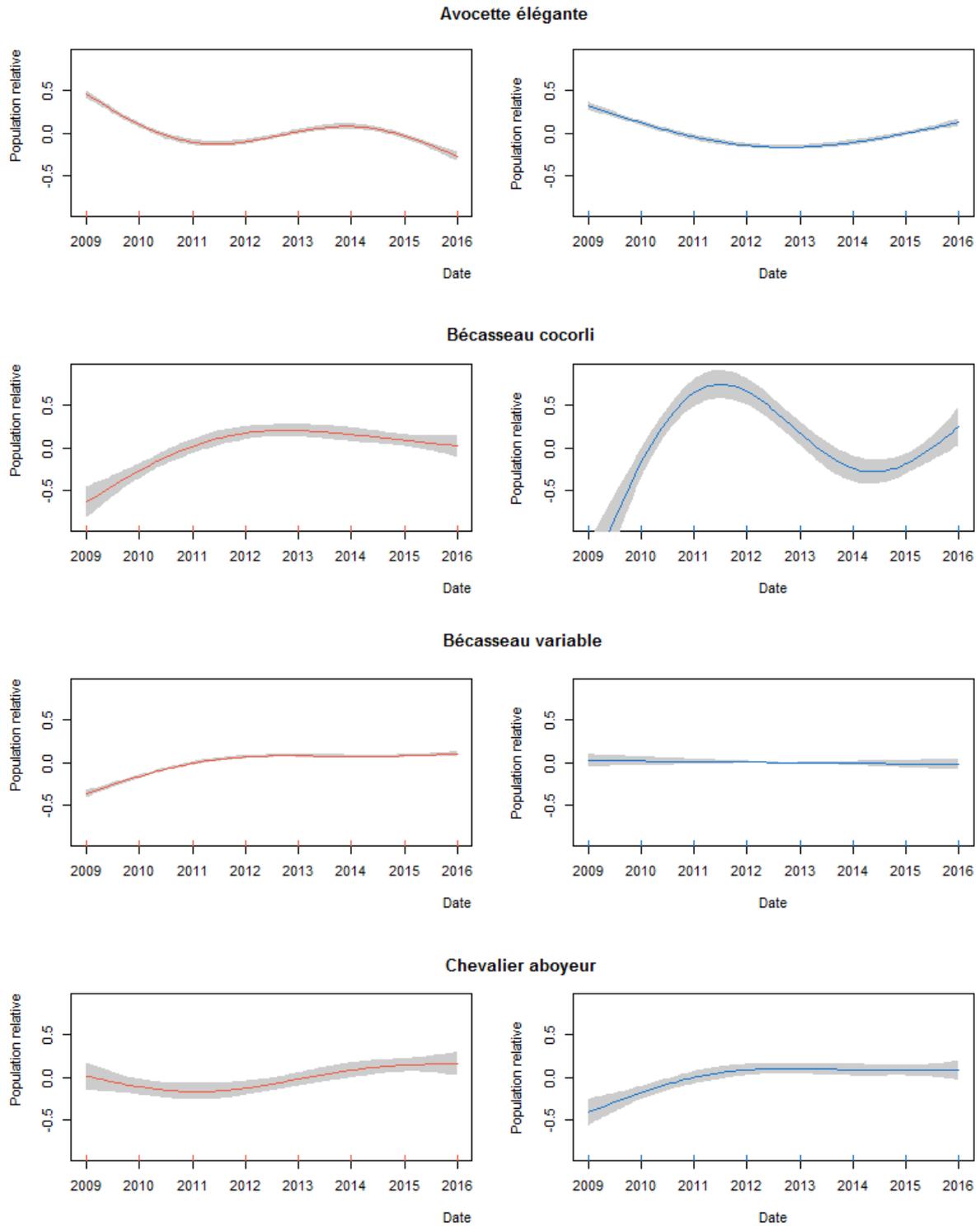


Figure 24 : Tendances estimées pour les effectifs de Laro-limicoles entre 2009 et 2016 sur le salin des Pesquiers (en rouge) et Vieux Salins (en bleu)

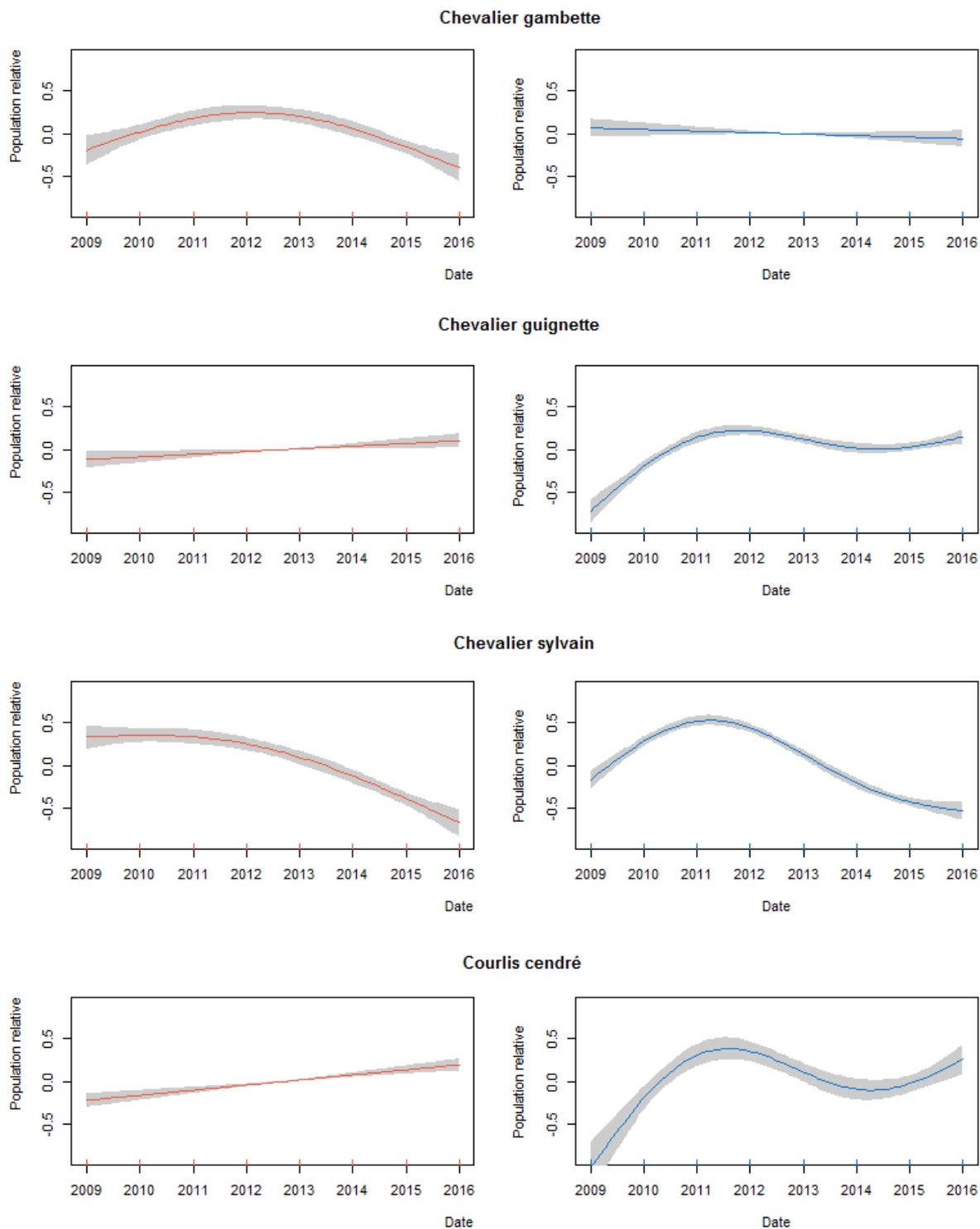


Figure 24 : Tendances estimées pour les effectifs de Laro-limicoles entre 2009 et 2016 sur le salin des Pesquiers (en rouge) et Vieux Salins (en bleu)

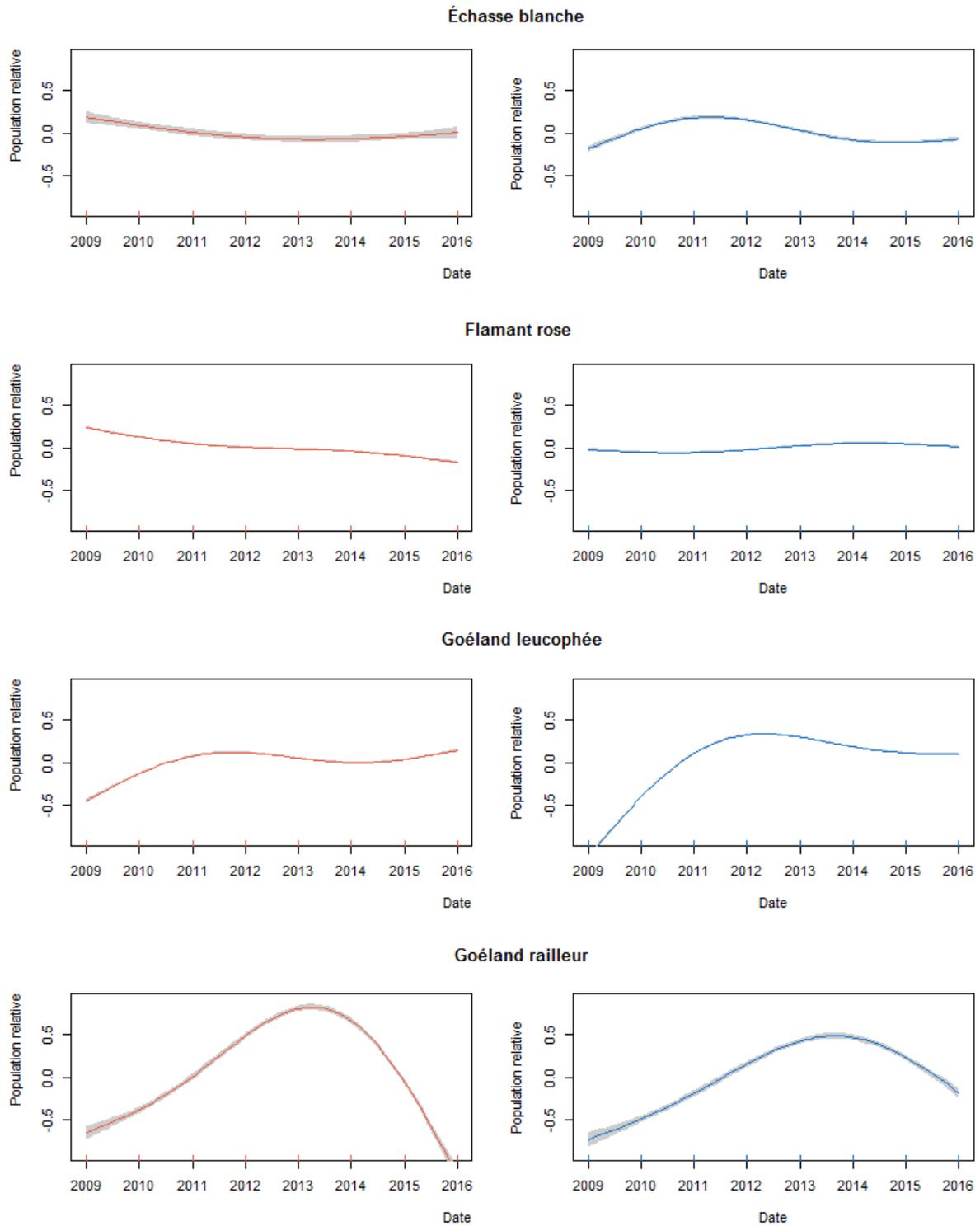


Figure 24 : Tendances estimées pour les effectifs de Laro-limicoles entre 2009 et 2016 sur le salin des Pesquiers (en rouge) et Vieux Salins (en bleu)

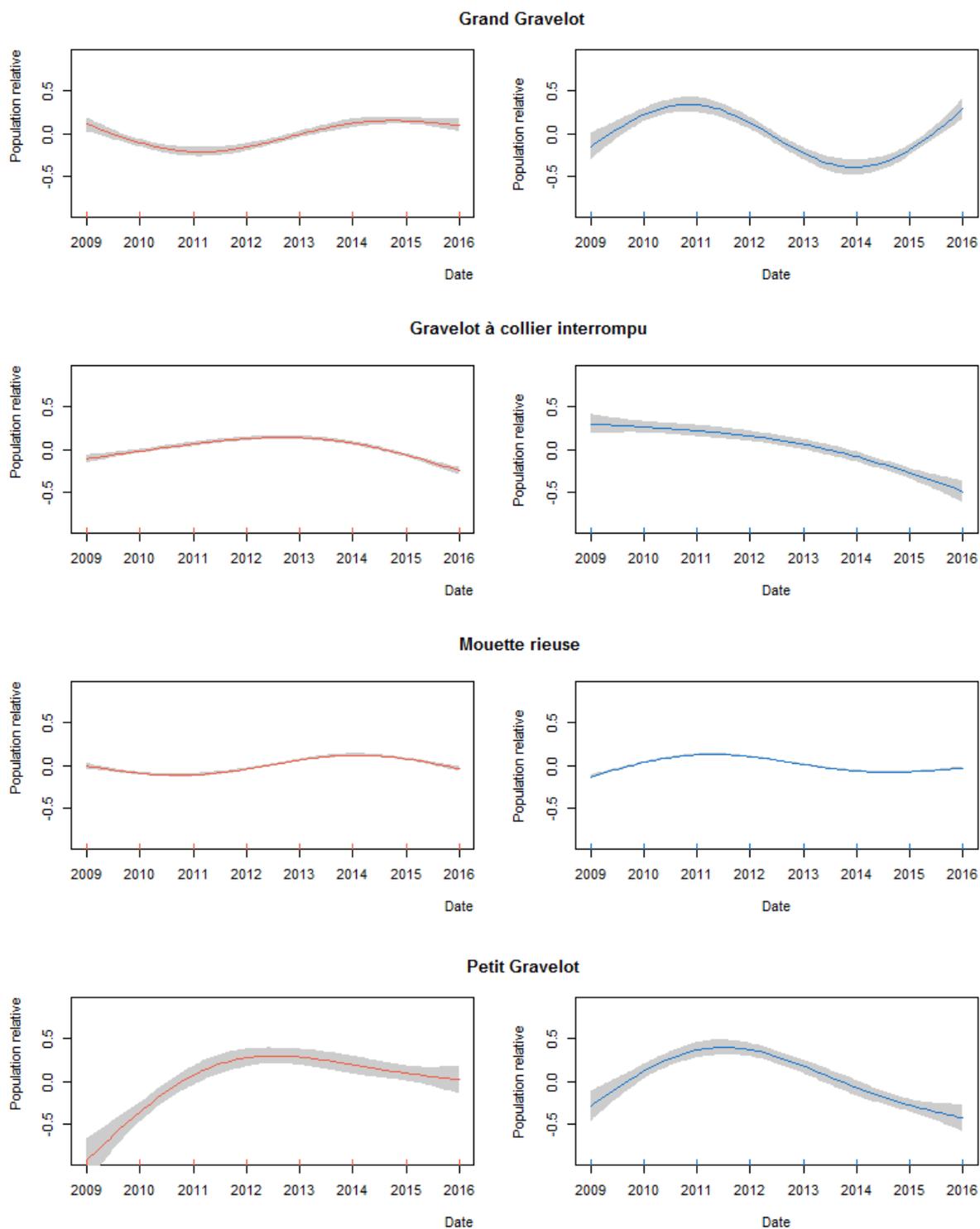


Figure 24 : Tendances estimées pour les effectifs de Laro-limicoles 2009 et 2016 sur le salin des Pesquiers (en rouge) et Vieux Salins (en bleu)

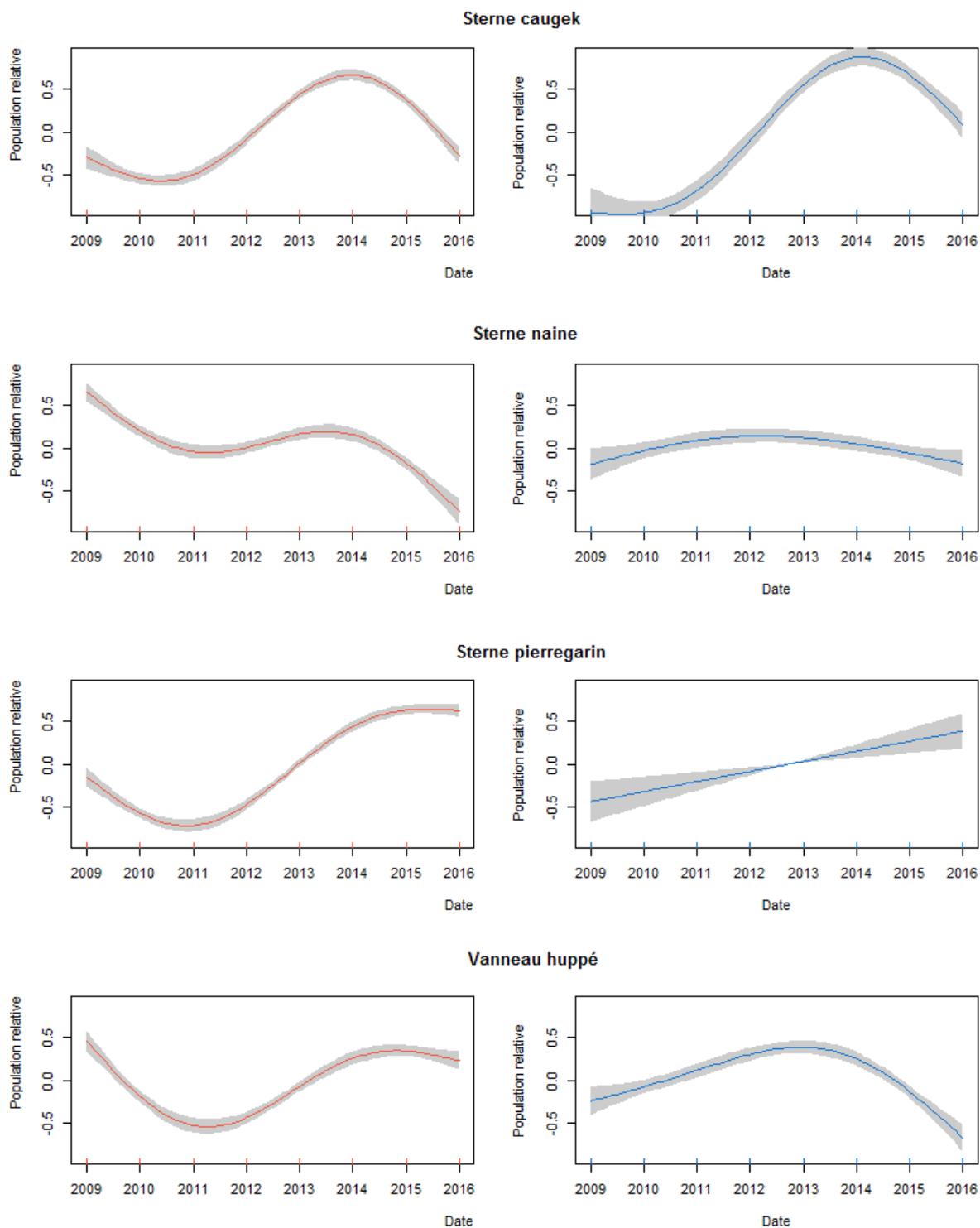


FIGURE 24 : TENDANCES ESTIMEES POUR LES EFFECTIFS DE LARO-LIMICOLES ENTRE 2009 ET 2016 SUR LE SALIN DES PESQUIERS (EN ROUGE) ET VIEUX SALINS (EN BLEU)

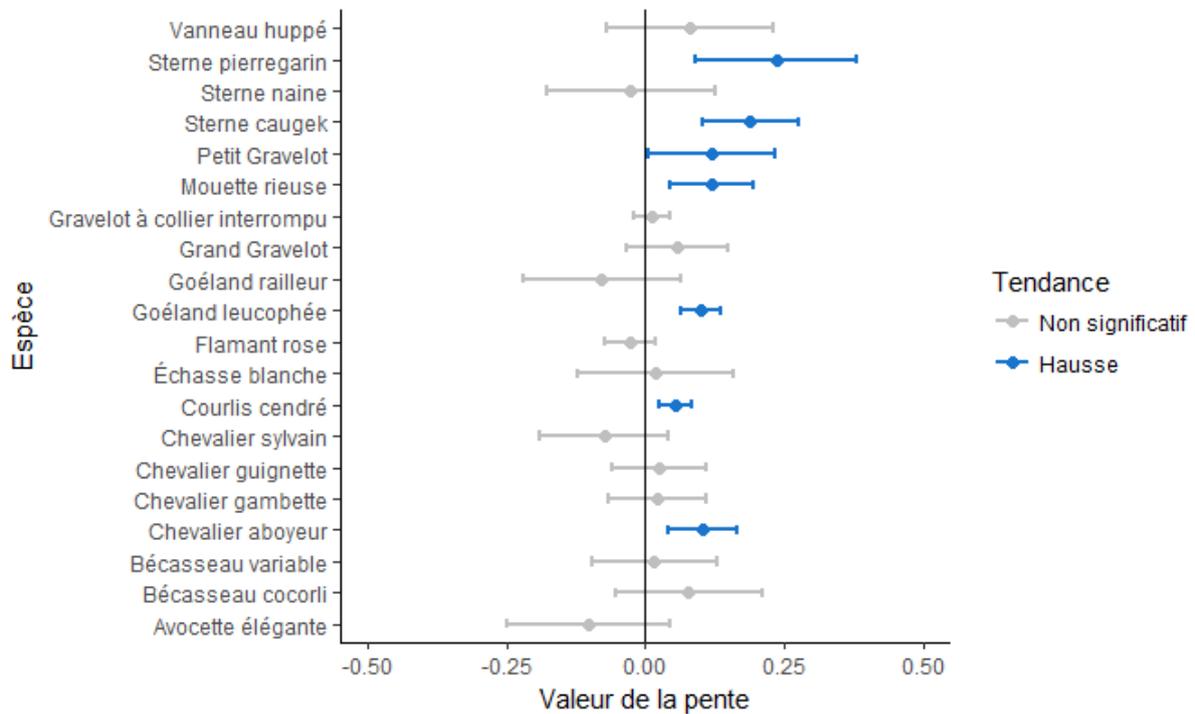


FIGURE 25: TENDANCES DES EFFECTIFS DE LARO-LIMICOLES SUR LA PERIODE 2009-2016 SUR LE SALIN DES PESQUIERS

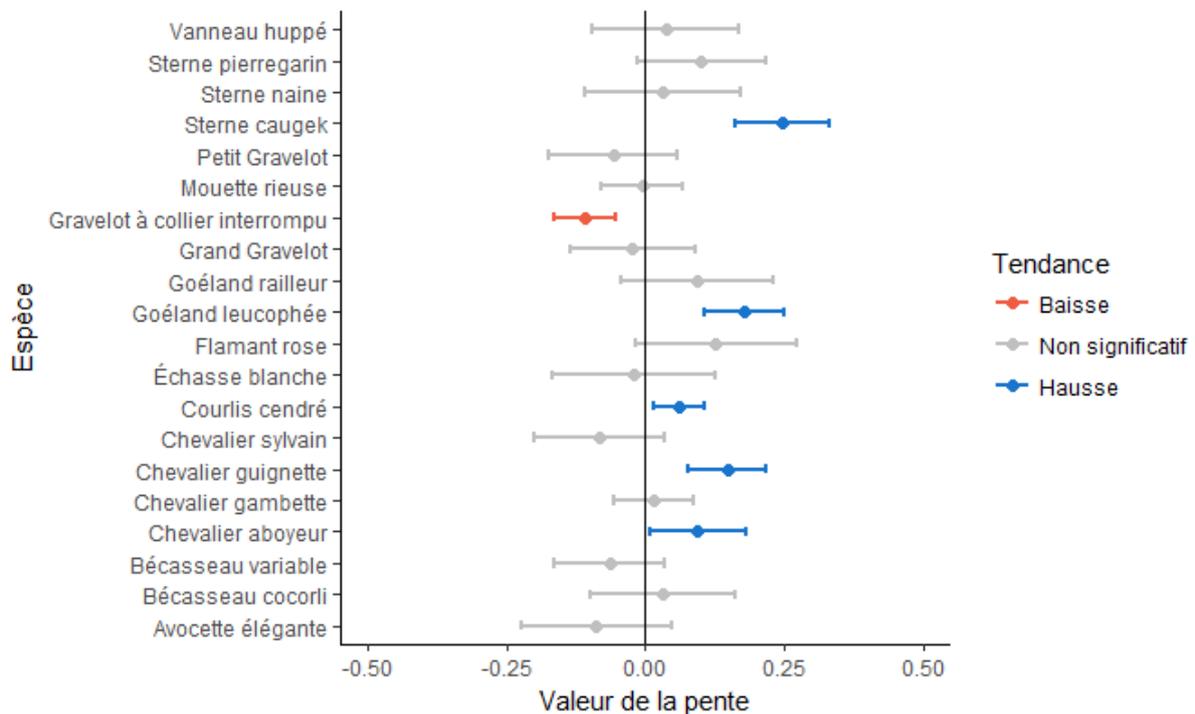


FIGURE 26: TENDANCES DES EFFECTIFS DE LARO-LIMICOLES SUR LA PERIODE 2009-2016 SUR LES VIEUX SALINS

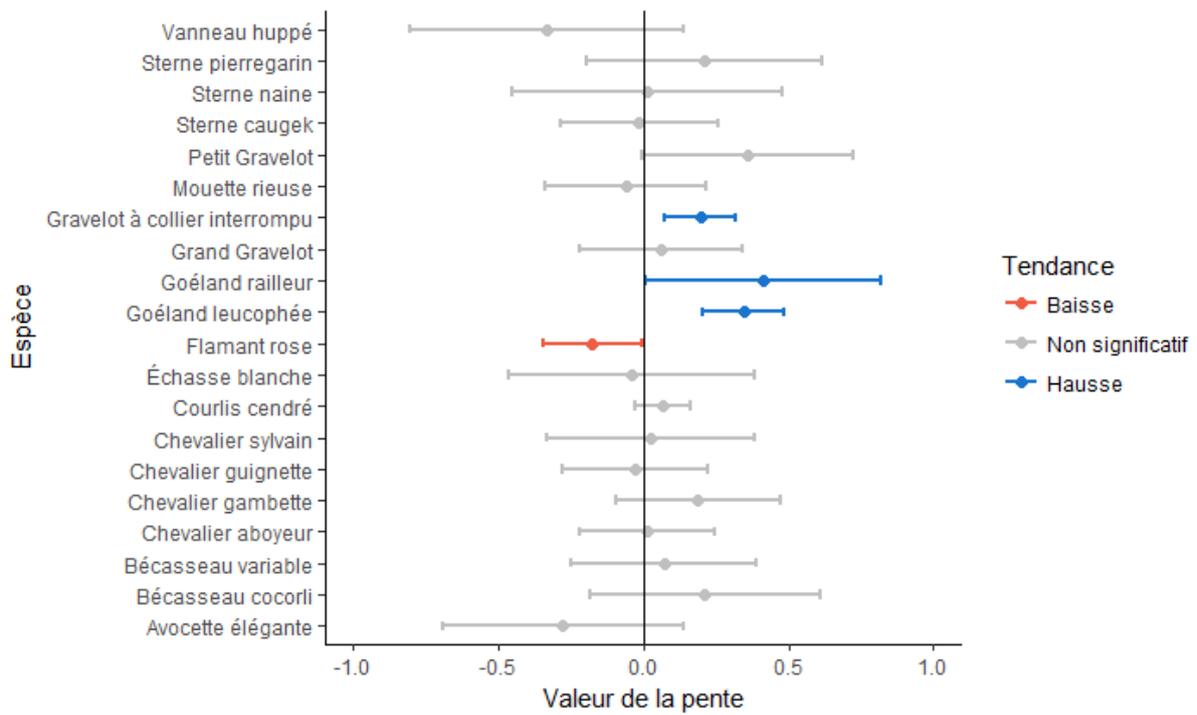


FIGURE 27 : TENDANCES DES EFFECTIFS DE LARO-LIMICOLES SUR LA PERIODE 2009-2012 SUR LE SALIN DES PESQUIERS

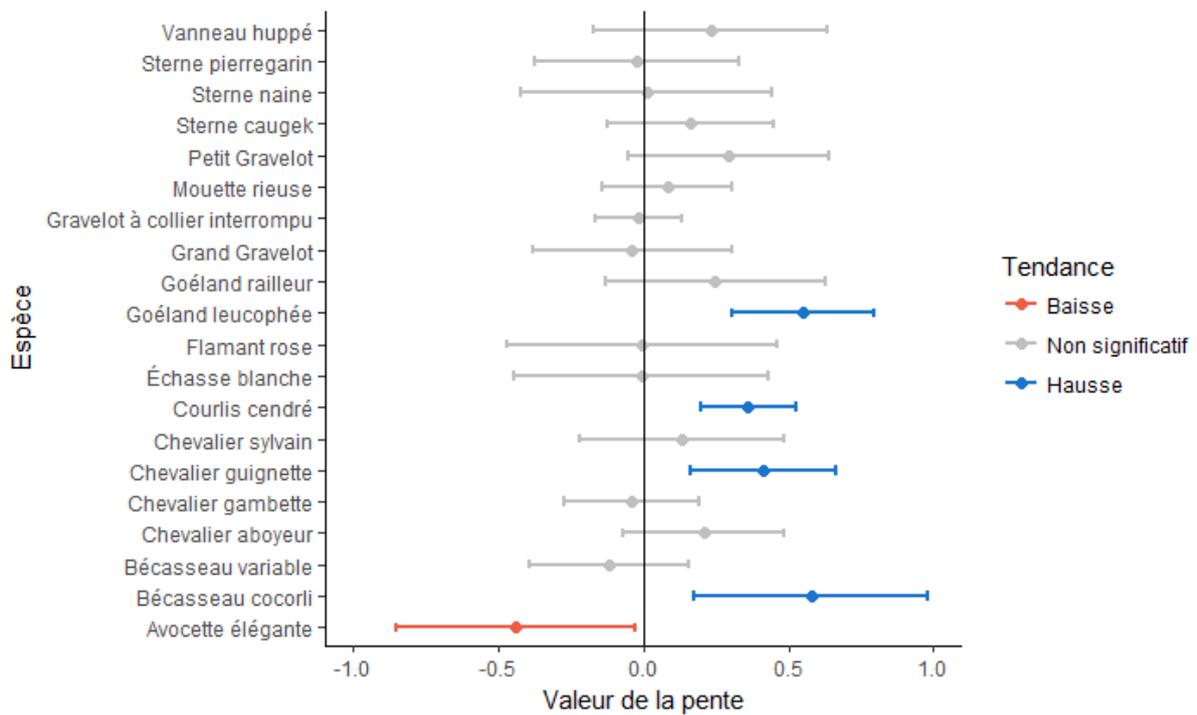


FIGURE 28 : TENDANCES DES EFFECTIFS DE LARO-LIMICOLES SUR LA PERIODE 2009-2012 SUR LES VIEUX SALINS

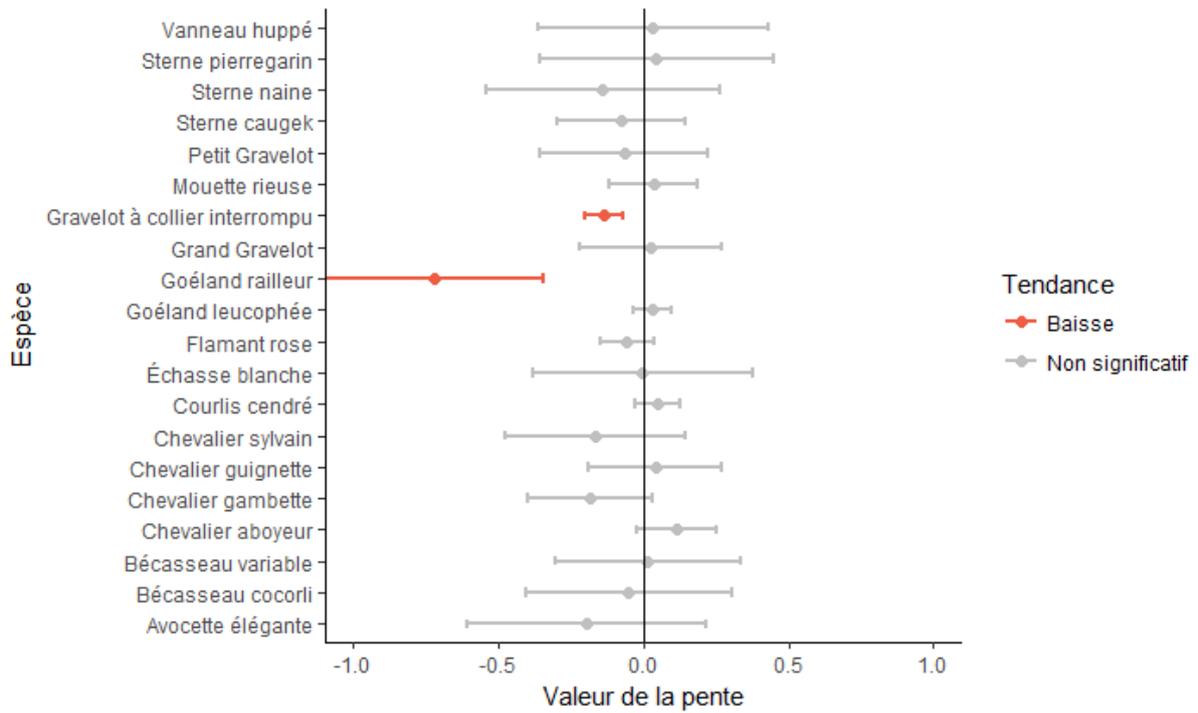


FIGURE 29 : TENDANCES DES EFFECTIFS DE LARO-LIMICOLES SUR LA PERIODE 2013-2016 SUR LE SALIN DES PESQUIERS

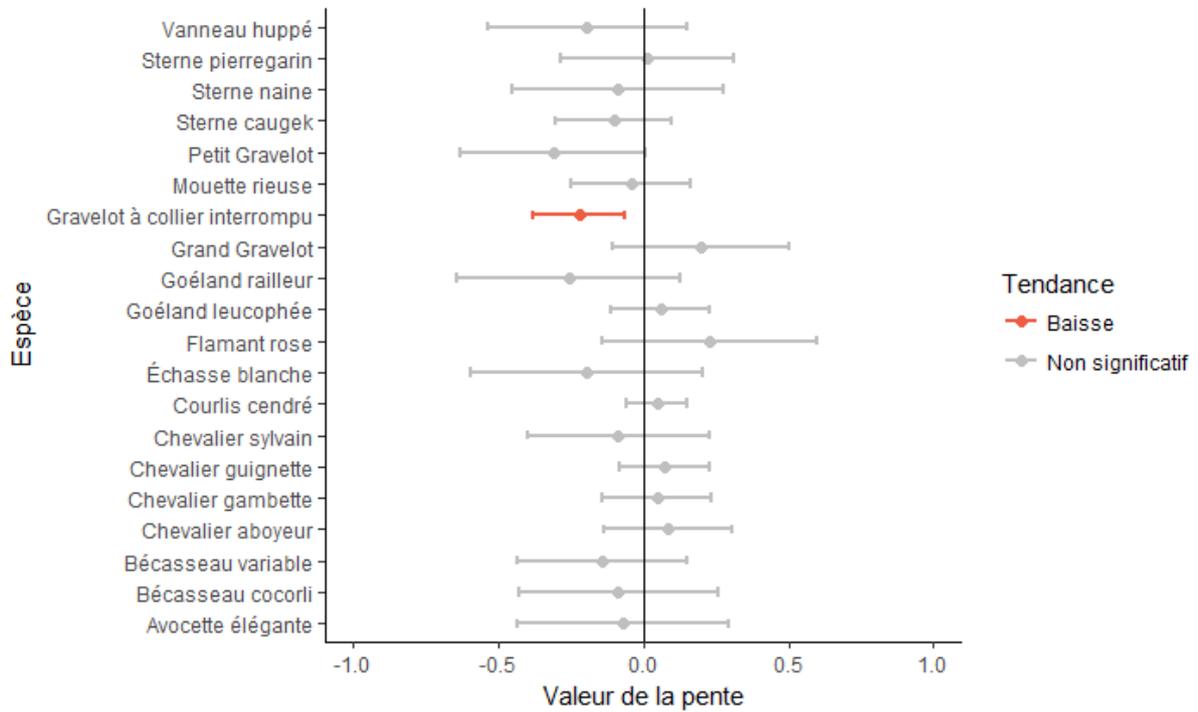


FIGURE 30 : TENDANCES DES EFFECTIFS DE LARO-LIMICOLES SUR LA PERIODE 2013-2016 SUR LES VIEUX SALINS