



ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE TOULOUSE

Rapport de projet de fin d'études

en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur agronome

Specialisation Agrogéomatique

**Utilisation des biostatistiques
dans la production d'un rapport d'état initial de l'avifaune
en réserve ornithologique**

FORT Romane

Maitre de stage : Rémi LANDEAU

Enseignant-référent : David SHEEREN

Septembre 2022

Illustrations de la page de garde :

- En haut à gauche : Pluvier argenté *Pluvialis squatarola* en plumage nuptial, Réserve Ornithologique du Teich, mai 2022.
- En haut à droite : Vol de Courlis cendrés *Numenius arquata* et Barge à queue noire *Limosa limosa*, Réserve Ornithologique du Teich, juin 2022.
- En bas à gauche : Vue de l'observatoire n°10 sur la « Vasière Spatule », lagune de la Réserve Ornithologique du Teich, juin 2022.
- En bas à droite : Avocette élégante *Recurvirostra avosetta* et ses poussins, Réserve Ornithologique du Teich, mai 2022.

Crédit photo : FORT R.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ANNEXES

LISTE DES ABREVIATIONS

ABSTRACT

1. INTRODUCTION	9
2. CONTEXTE.....	10
2.1. Administration du site et zonages environnementaux	10
2.2. Principaux habitats et topographie	12
3. DÉFINITION DES NOTIONS.....	14
3.1. Termes techniques	14
3.2. Termes thématiques.....	14
4. DONNÉES, MATÉRIEL ET MÉTHODES	16
4.1. Acquisition des données ornithologiques : protocole de comptage.....	16
4.2. Formalisme des données de comptage	20
4.3. Autres données utilisées.....	22
4.4. Logiciels employés.....	23
4.5. Méthodes d'analyse	23
5. RÉSULTATS.....	33
5.1. Thème 1 : Tendances et évolution temporelle de la population	33
5.2. Thème 2 : Disparités spatiales et analyses écologiques	37
5.3. Thème 3 : Rapport aux facteurs bioclimatiques et environnementaux	43
6. DISCUSSION	53
6.1. Critique des analyses effectuées.....	53
6.2. Estimation des biais et pistes de corrections	54
7. PERSPECTIVES.....	55
7.1. Perspectives d'amélioration et de consolidation de l'état initial.....	55
7.2. Perspectives de complétion et pistes à explorer	55
7.3. Perspectives de structuration des données dès la saisie.....	57
7.4. Perspectives d'adaptation des pratiques de gestion	58
8. RETOUR SUR EXPERIENCE	58
9. CONCLUSION	60
BIBLIOGRAPHIE	
ANNEXES	

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'accomplissement de ce projet.

Tout d'abord, merci à Véronique Hidalgo et Cyril Forchelet, respectivement directrice et ex-conservateur de la Réserve Ornithologique du Teich, sans qui ce stage n'aurait pas été possible en premier lieu. Merci de m'avoir accueillie dans cette superbe structure pour ce superbe projet.

Merci à toute l'équipe technique et à toute l'équipe d'animation pour leur accueil chaleureux. Grâce à vous, je ne me suis pas seulement sentie comme une stagiaire de passage, mais comme une collègue, comme l'une des vôtres, et cette sensation était inestimable. Je ne prendrais pas le risque de tous vous nommer : je m'en voudrais d'en oublier un ou une, mais mes pensées vont droit à chacun d'entre vous.

Merci à Romain Lorrillière, à Annie Ouin et à Frédéric Barraquand pour le soutien ponctuel que vous avez apporté à ce projet. Merci pour votre aide qui m'a été précieuse, merci d'avoir pris sur votre temps pour vous pencher sur mes questions et pour m'avoir aidée à y trouver des réponses.

Merci à Claude Feigné et Alain Fleury, ex-conservateurs de la Réserve Ornithologique du Teich, pour avoir pris le temps de répondre à mes questions, parfois pointues, parfois très vastes, mais vous demandant toujours d'aller explorer les tréfonds de votre mémoire, ce que vous avez fait avec patience et gentillesse.

Merci à Jérôme, Stéphane, Pierre, Christian, Eglantine, Georges, Erick, Jacques, Michel, Annie et Anne, qui avez gentiment accepté de me partager vos photos afin qu'elles figurent sur ce rapport de stage. C'est grâce à vous que ce rapport peut présenter exclusivement des photographies prises sur la Réserve Ornithologique du Teich ! Merci enfin pour vos encouragements qui me vont droit au cœur.

Merci à Paul, Céline, Sam et Aimée, soutiens inattendus mais inestimables, pour avoir apporté des solutions si simples à des problèmes qui me paraissaient si compliqués ! Je ne saurais estimer le temps que vous m'avez fait gagner, en proposant des idées évidentes et fonctionnelles auxquelles je n'avais même pas pensé.

Merci à David Sheeren pour votre accompagnement tout au long de ce projet. Merci de m'avoir rassurée lors des phases de doutes et recentrée lorsque je perdais de vue la direction de mon projet. Merci d'avoir été un référent que je savais pouvoir solliciter, même si cela ne s'est montré que peu nécessaire.

Et enfin, merci à Rémi Landeau. Je ne saurais te remercier en quelques lignes à la hauteur de tout ce que tu as fait pour moi. Merci pour ta patience et pour ta pédagogie, merci de m'avoir soutenue... Merci de m'avoir embarquée sur le terrain malgré mon manque débrouillardise. Merci d'avoir cru en moi souvent plus que je n'y croyais moi-même. Tu as été un soutien inestimable sur le plan professionnel comme sur le plan moral, et je suis sincèrement heureuse de t'avoir eu pour maître de stage.

LISTE DES FIGURES

En l'absence de précisions concernant la source, la figure présentée est une production personnelle.

Figure 1 : Localisation géographique de la Réserve Ornithologique du Teich et du PNRLG.

Figure 2 : Cartographie des zonages environnementaux incluant la Réserve Ornithologique du Teich (Source : INPN).

- a. ZNIEFF de types I et II.
- b. Zonages d'importance internationale.

Figure 3 : *Baccharis halimifolia* sur la Réserve Ornithologique du Teich (Crédit photo : Fort R.).

- a. Plante entière.
- b. Détail du feuillage.

Figure 4 : Cartographie simplifiée des habitats de la Réserve Ornithologique du Teich.

Figure 5 :

- a. Avocette élégante *Recurvirostra avosetta* (Crédit photo : Mouillet P.).
- b. Grand gravelot *Charadrius hiaticula* (Crédit photo : Delarue A.).
- c. Courlis corlieu *Numenius phaeopus* (Crédit photo : Fort R.).

Figure 6 : Cartographie des unités de comptage de la Réserve Ornithologique du Teich.

Figure 7 :

- a. Gorgebleue à miroir blanc *Luscinia svecica namnetum* (Crédit photo : Gillon J.).
- b. Martin-pêcheur d'Europe *Alcedo atthis* (Crédit photo : Fort R.).
- c. Torcol fourmilier *Jynx torquilla* (Crédit photo : Laucher E.).

Figure 8 : Nombre annuel d'observations transmises sur Faune-Aquitaine, tous utilisateurs (Source : Faune-Aquitaine.org, LPO Aquitaine).

Figure 9 : Extrait du jeu de données annoté pour illustrer le vocabulaire associé.

Figure 10 : Chaîne synthétique des processus et résultats intermédiaires de la phase de préparation du jeu de données.

Figure 11 : Comparaison des lois de Poisson ($V = E = \lambda$) et quasi-Poisson ($E = \lambda, V = 2\lambda$) à $\lambda = 5$.

Figure 12 :

- a. Vol de Bécasseaux variables *Calidris alpina* (Crédit photo : Laucher E.)
- b. Chevalier guignette *Actitis hypoleucos* (Crédit photo : De Waële C.)

Figure 13 : Aires mondiales de nidification (en orange) et d'hivernage (en bleu) du Courlis cendré *Numenius arquata* (Source : BirdLife International, 2020).

Figure 14 : Carte mondiale des températures moyennes (1970-2000) en période de nidification (Résolution 30x30 km, source des données : WordClim, 2017).

Figure 15 : Variation interannuelle des effectifs d'Avocette élégante *R. avosetta* entre 1981 et 2021.

Figure 16 : Variations interannuelles des effectifs de Courlis cendré *N. arquata* entre 1981 et 2021.

Figure 17 : Préférences de 19 espèces communes de limicoles et échassiers quant à la profondeur de l'eau (Source : Ntiamoa-Baidu Y. & al., Université de Groningen, 1998).

Figure 18 : Phénologie saisonnière de la fréquentation de la ROT par le Canard souchet *Anas clypeata* et le Chevalier guignette *Actitis hypoleucos*.

Figure 19 : Répartition mensuelle du Courlis cendré *N. arquata* sur les différentes unités de comptage.

Figure 20 : Répartition mensuelle du Chevalier guignette *A. hypoleucos* sur les différentes unités de comptage.

Figure 21 : Répartition des oiseaux sur les différentes unités de comptage.

- a. En saison d'hivernage.
- b. En saison migratoire.
- c. En saison de nidification.

Figure 22 : Indice de Shannon par saison biologique pour chaque unité de comptage.

Figure 23 : Evolution annuelle de l'indice de Shannon par saison biologique sur l'ensemble de la ROT.

Figure 24 : Classification des unités de comptages par similarité des populations d'oiseaux annuelles.

Figure 25 : Cartographie des unités de comptages par similarité des populations d'oiseaux annuelles.

Figure 26 : Boxplots de l'influence du coefficient de marée sur l'abondance de Grands gravelots *Charadrius hiaticula* en saison d'hivernage.

Figure 27 : Boxplots de l'influence du coefficient de marée sur l'abondance de Courlis cendrés *N. arquata* en saison d'hivernage.

Figure 28 : Boxplots de l'influence circadienne sur l'abondance de Barges à queue noire *Limosa limosa* en saison d'hivernage.

Figure 29 : Evolution de l'indice thermique des communautés hivernantes entre 1981 et 2022.

Figure 30 : Contributions spécifiques à la variation interannuelle du CTI hivernal entre 1981 et 2022.

Figure 31 : Evolution de l'indice thermique des communautés estivantes entre 1981 et 2021.

Figure 32 : Contributions spécifiques à la variation interannuelle du CTI estival entre 1981 et 2021.

Figure 33 : Abondance des Courlis cendrés *N. arquata* en fonction des coefficients de marée.

Figure 34 : Superposition des variations cycliques intuitées sur la courbe de dynamique interannuelle du Bécasseau variable *Calidris alpina* en période d'hivernage.

Figure 35 : Décalage de la phénologie migratoire du Chevalier gambette *Tringa totanus* entre 2012 et 2021.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Liste des espèces avifaunistiques patrimoniales de la Réserve Ornithologique du Teich.
(Source : ROT, 2017, modifiée.)

Tableau 2 : Synthèse de l'évolution des protocoles de comptage en fonction des espèces entre 1973 et 2022.

Tableau 3 : Liste des champs d'intérêt du jeu de données de comptage.

Tableau 4 : Liste et descriptif des champs créés durant la préparation des données.

Tableau 5 : Correspondance entre les noms anglophones, scientifiques et francophones des espèces présentées en figure 10.

Tableau 6 : Tableau récapitulatif de la significativité de l'influence du coefficient de marée

Tableau 7 : Tableau récapitulatif de la significativité de l'influence de la période circadienne.

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Table des lois.

Annexe 2 : Liste des 326 espèces contactées sur la Réserve Ornithologique du Teich.

Annexe 3 : Liste des packages R utilisés et références.

Annexe 4 : Détail des classes définies lors de la stratification.

Annexe 5 : Dynamiques interannuelles des espèces patrimoniales.

Annexe 6 : Phénologie annuelle des espèces patrimoniales.

Annexe 7 : Influence du coefficient de marée sur l'abondance des espèces patrimoniales.

Annexe 8 : Influence de la demi-journée sur l'abondance des espèces patrimoniales.

Annexe 9 : Fragments de l'évolution du CTI en période d'hivernage.

Annexe 10 : Fragments de l'évolution du CTI en période de nidification.

Annexe 11 : Prototype de guide de saisie des données de comptage.

Annexe informatique :

L'ensemble des scripts produits au cours de ce projet est accessible sur GitHub à l'adresse suivante :

https://github.com/Romane-F/Analyses_Teich

LISTE DES ABBREVIATIONS

ANOVA : Analysis of variance (i.e. Analyse de la variance)

CAH : Classification Ascendante Hiérarchique

CAHAB : Cahiers d'Habitats

CBNSA : Conservatoire Botanique National Sud-Atlantique

CORINE : Coordination de l'Information sur l'Environnement

CRBPO : Centre de Recherches sur la Biologie des Populations d'Oiseaux

CTI : Community Temperature Index (i.e. Indice Thermique des Communautés)

ENS : Espace Naturel Sensible

EUNIS : European Nature Information System

FA : faune-aquitaine.org

GAM : Generalized Additive Models (i.e. Modèles additifs généralisés)

GANTT : Generalized Activity Normalization Time Table

IGN : Institut National de l'Information Géographique et Forestière

INPN : Inventaire National du Patrimoine Naturel

LIDAR : Light Detection and Ranging

LPO : Ligue pour la Protection des Oiseaux

MNBA : Maison de la Nature du Bassin d'Arcachon

MNHN : Muséum National d'Histoire Naturelle

OPNL : Observatoire du Patrimoine Naturel Littoral

ORRNA : Observatoire des Risques de la Région Nouvelle-Aquitaine

PERT : Program Evaluation and Review Technique

PNRLG : Parc Naturel Régional des Landes de Gascogne

RNF : Réserves Naturelles de France

RNN : Réserve Naturelle Nationale

ROT : Réserve Ornithologique du Teich

SIBA : Syndicat Intercommunal du Bassin d'Arcachon

SIG : Systèmes d'Information Géographique

SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

STI : Species Temperature Index (i.e. Indice Thermique Spécifique)

STOC : Suivi Temporel des Oiseaux Communs

UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature

USN : Unité de Suivi Naturaliste

ZICO : Zone Importante pour la Conservation des Oiseaux

ZNIEFF : Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique

ZPS : Zone de Protection Spéciale

ZSC : Zone Spéciale de Conservation

ABSTRACT

Teich Bird Reserve is a preserved place in the heart of the very urbanized Bay of Arcachon (Gironde, France) and constitutes an exceptional quiet habitat for shorebirds. Since its creation in 1972, birds are frequently counted. On the basis of this data, this study aspires to understand population dynamics of 17 bird species since 1981 – date from which a counting protocol was established, as well as the causes that can explain those populations variations. Data was extracted from Faune-Aquitaine.org website (URL : www.faune-aquitaine.org) and analyzed using R (© The R Foundation, 2020). Intra and inter-annual variations were calculated and repartition of different birds over the Reserve was described. Influence of tides, tidal coefficients, counting hour, weather and climate change over species' abundance was tested. Weather was the only factor that appeared ineffective over all species. The others seemed to affect birds' species according to their biology and their use of Teich Bird Reserve.

1. INTRODUCTION

Située à l'extrémité sud-est du bassin d'Arcachon, la Réserve Ornithologique du Teich constitue un refuge pour l'avifaune et en particulier pour l'avifaune aquatique côtière. Depuis sa création en 1972, 326 espèces d'oiseaux sauvages [1](ROT¹, 2021), tous taxons confondus, y ont été détectées.

Parmi ces 326 espèces dont certaines sont occasionnelles, d'autres en revanche fréquentent régulièrement les 110 ha du site, parfois en effectifs conséquents. Ainsi, la ROT a été reconnue site d'importance nationale ou internationale pour 17 espèces dites « patrimoniales » d'anatidés et de limicoles en hivernage en concentrant respectivement, pour chacune de ces espèces, au moins 1% de l'effectif national ou international estimé [2,3](Wetlands International & Secrétariat de la Convention de Ramsar, 1971).

A ce titre, la Réserve Ornithologique du Teich représente un espace à enjeux, protégé et inscrit dans divers zonages environnementaux [4](ROT, 2017). Bien avant d'être un site touristique et autrefois un centre de soins de la faune sauvage, elle remplit une fonction de préservation et de documentation, au moyen de nombreux suivis scientifiques de la faune et de la flore observables sur le site, et en particulier des oiseaux.

Depuis 1973, l'avifaune qui fréquente la ROT est régulièrement dénombrée. Ces comptages permettent de construire une photographie de l'avifaune observable sur l'intégralité de la Réserve à un instant donné et ainsi de documenter la fréquentation ornithologique du site. Grâce à leur archivage, il est possible de tracer une série temporelle de ces comptages et de les analyser. Via l'utilisation des biostatistiques, quelles conclusions peut-on tirer sur l'évolution des populations d'oiseaux sur le site ? Quels sont les facteurs qui influencent leur abondance et leur diversité ? Est-il possible d'estimer les effets de la gestion, en particulier de la gestion hydraulique, effectuée sur la Réserve depuis sa création ?

Le travail présenté dans ce rapport est le fruit d'un projet prospectif, qui diverge des travaux précédemment réalisés [5](Barraquand & al., 2022) par ses objectifs ainsi que par les axes étudiés et les espèces cibles. Il sera concentré principalement sur les 17 espèces patrimoniales de la ROT, exception faite des indicateurs dépendant de l'intégralité de la communauté. Ce rapport explorera trois thèmes principaux :

- l'évolution temporelle des populations d'oiseaux sur la ROT,
- la spatialisation de ces populations sur les différents secteurs du site,
- les facteurs explicatifs qui peuvent avoir une influence sur la présence et l'abondance des espèces patrimoniales.

Après une explication du contexte dans lequel évolue le site, les notions abordées seront définies et expliquées. Par la suite, le formalisme des données, leur protocole d'acquisition et les méthodes d'analyse seront détaillés. Les résultats majeurs seront ensuite présentés et interprétés. Enfin nous porterons un regard critique sur le travail effectué et nous apporterons une réflexion sur les pistes d'amélioration et les perspectives qui resteront à explorer.

¹ Réserve Ornithologique du Teich

2. CONTEXTE

2.1. Administration du site et zonages environnementaux

La Réserve Ornithologique du Teich s'inscrit dans une démarche communale d'éco-tourisme et de préservation et valorisation du patrimoine naturel. Il s'agit d'une entité hybride, cogérée par la Mairie du Teich et par le Parc Naturel Régional des Landes de Gascogne. En effet, les bureaux sont hébergés dans la MNBA¹, appartenant au PNRLG² tandis que le site est propriété de la commune du Teich. De même, l'équipe de gestionnaires est constituée de techniciens employés par la mairie et supervisés par un conservateur employé par le PNR.

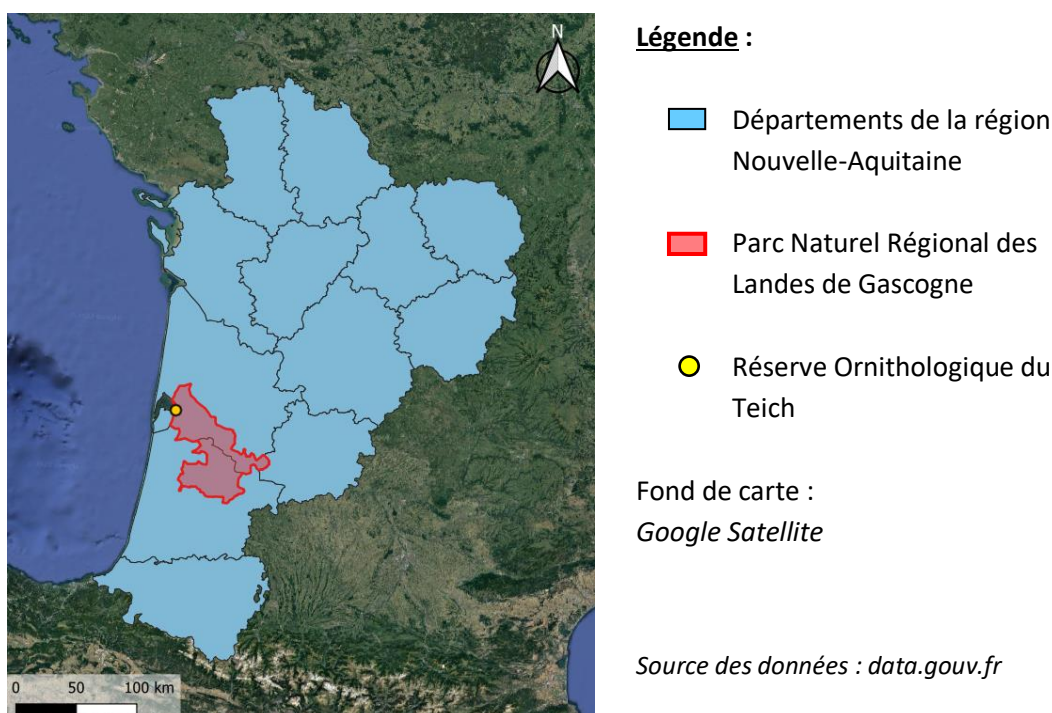


Figure 1 : Localisation géographique de la Réserve Ornithologique du Teich et du PNRLG

Au-delà de ce zonage administratif, la ROT est incluse dans six zonages environnementaux en lien avec la documentation et la protection du patrimoine naturel. Elle est ainsi inscrite dans les unités suivantes :

- ZNIEFF³ de type I – n° 720002370 : Domaines endigués du delta de la Leyre.
- ZNIEFF de type II – n° 720001949 : Bassin d'Arcachon.

Une ZNIEFF de type II constitue un espace naturel riche et peu modifié, avec un fort potentiel biologique et présente un intérêt pour la conservation de la biodiversité et des habitats. Elle héberge généralement plusieurs ZNIEFF de type I. Ces dernières, de superficie plus restreintes, sont caractérisées par la présence d'espèces rares, remarquables ou caractéristiques du patrimoine naturel régional, national ou européen.

¹ Maison de la Nature du Bassin d'Arcachon

² Parc Naturel Régional des Landes de Gascogne

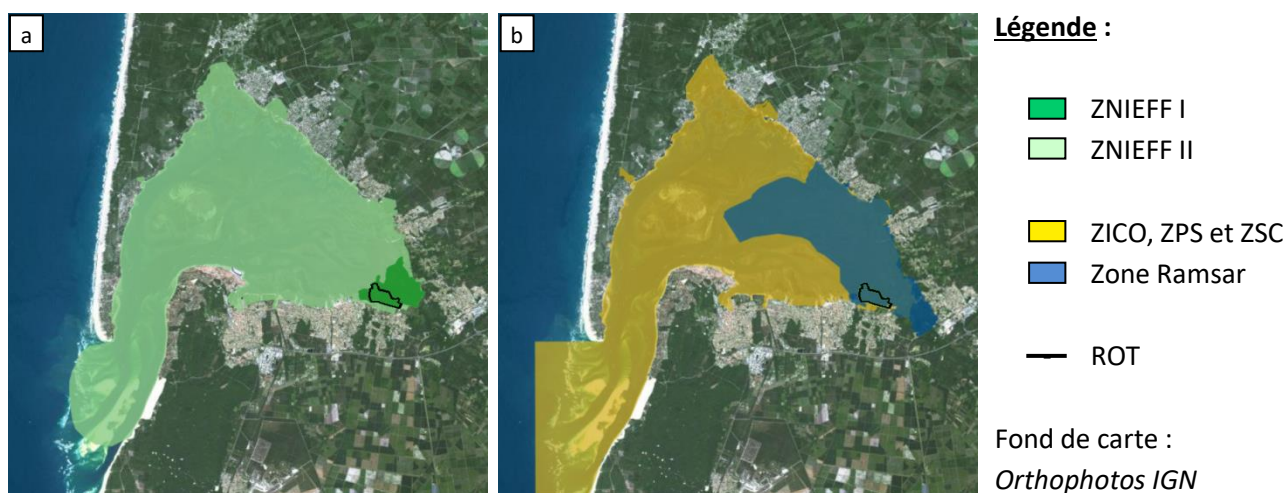
³ Zone Naturelle d'Intérêt Ecologique Faunistique et Floristique

- ZICO¹ – n° AN01 et ZPS² – n° FR7212018 : Bassin d’Arcachon et Réserve Naturelle du Banc d’Arguin.
- ZSC³ – n° 7200679 : Bassin d’Arcachon et Cap Ferret.

Les ZICO, zonages aujourd’hui peu utilisés, ont servi de base à la définition des ZPS dans le cadre de la directive européenne du 25 avril 1979 dite « Directive Oiseaux » (voir table des lois en Annexe 1). Ces ZPS, comme les ZSC définies dans le cadre de la « Directive Habitats » du 21 mai 1992, sont rassemblés sous l’appellation générique de sites Natura 2000 et présentent des intérêts et enjeux écologiques reconnus à l’échelle européenne.

- Zone Ramsar : Bassin d’Arcachon – Secteur du Delta de la Leyre.

Enfin, les zones Ramsar [6](Secrétariat de la Convention de Ramsar, 2006) définissent des zones humides d’importance internationale. Le secteur du Delta de la Leyre en fait partie intégrante notamment en se constituant site d’importance internationale pour les oiseaux d’eau en accueillant régulièrement au moins 20 000 oiseaux d’eau sur sa superficie, et en accueillant au moins 1% de la population internationale d’au moins 1 espèce d’oiseaux d’eau.



*Figure 2 : Cartographie des zonages environnementaux incluant la Réserve Ornithologique du Teich
(source : INPN).*

a. ZNIEFF de types I et II

b. Zonages d’importance internationale

Ces multiples zonages environnementaux découlent et témoignent de l’importance écologique du site en matière de biodiversité et patrimoine naturel, à l’échelle nationale et internationale.

¹ Zone Importante pour la Conservation des Oiseaux

² Zone de Protection Spéciale

³ Zone Spéciale de Conservation

2.2. Principaux habitats et topographie

Bien qu'une classification détaillée des habitats sur base d'analyses phytosociologiques ait été récemment établie par le CBNSA¹, par souci de focalisation, nous présenterons ici une cartographie simplifiée des principaux habitats constituant les espaces émergés et immergés de la ROT.

Sur les 110 ha que compte la Réserve Ornithologique du Teich, 75 sont immergés. Parmi ceux-ci, 70 ha sont occupés par de l'eau saumâtre, mélange de l'eau douce de la Leyre et de l'eau salée du bassin d'Arcachon, et 5 sont maintenus en eau douce par l'apport d'eau de pluie et l'utilisation d'un canal de rétention.

Concernant les terres émergées, qui occupent les 35 ha restants, il s'agit essentiellement de prairies mésohygrophiles et subhalophiles thermoatlantiques – autrement dit, des zones de végétation rase adaptée aux milieux chauds, légèrement salés et relativement secs, et plutôt caractéristiques de la façade atlantique.

Une vaste surface est occupée par de la végétation arbustive, c'est notamment le cas des abords des sentiers et des digues. Ces haies sont principalement composées de ronciers, prunelliers, tamaris et baccharis. Ce dernier, dont le nom complet est *Baccharis halimifolia*, est une espèce exotique envahissante fortement répandue sur le bassin d'Arcachon après avoir été importée pour son côté esthétique. Une partie de la gestion de la ROT est aujourd'hui orientée de manière à le faire régresser afin de favoriser la végétation autochtone.



Figure 3 : *Baccharis halimifolia* sur la Réserve Ornithologique du Teich (crédit photo : Fort R.).

a. Plante entière

b. Détail du feuillage

A l'exception de quelques roselières et des espaces aménagés, le reste de la ROT, principalement le côté sud, est occupé par divers types de boisements.

¹ Conservatoire Botanique National Sud-Atlantique

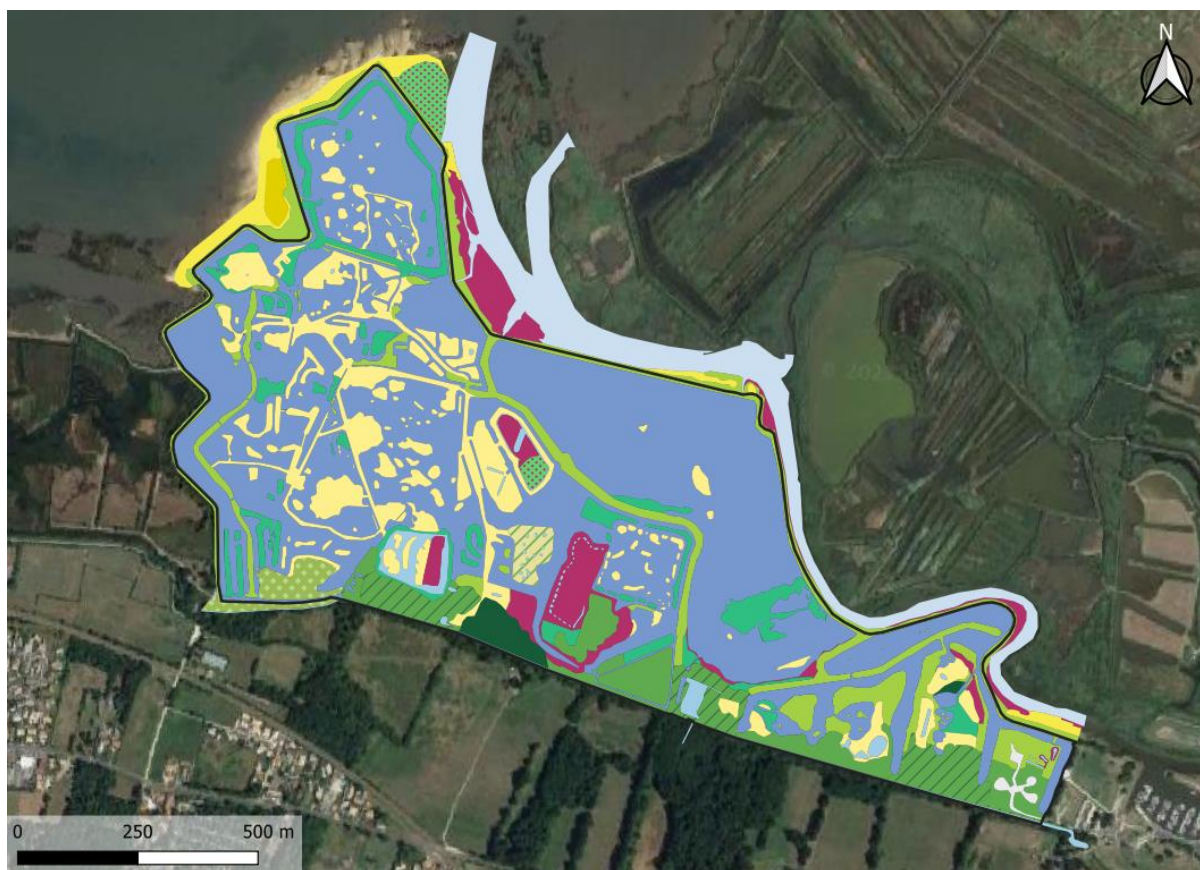


Figure 4 : Cartographie simplifiée des habitats de la Réserve Ornithologique du Teich

Légende :

Espaces naturels immergés :

- Cours d'eau saumâtre
- Eaux douces stagnantes
- Eaux saumâtres stagnantes

Espaces aménagés :

- Parking

Espaces naturels émergés :

- | | |
|--|---|
| Chênaies | Roselière |
| Forêts de conifères | Prairies mésohygrophiles |
| Forêts mixtes | Prairies mésophiles |
| Boisements humides | Pelouses pionnières |
| Végétation haute et arbustive | Sable |
| Baccharis | Formation dunaires |
| Roselière, arbustes | |

Cette diversité de milieux lui permet d'accueillir une avifaune variée, où des espèces paludicoles (telles que la Gorgebleue à miroir *Luscinia svecica*) côtoient des espèces de milieux buissonnants (comme l'Hypolaïs polyglotte *Hippolais polyglotta*) ou forestiers (comme le Pouillot véloce *Phylloscopus collybita*). C'est ainsi que depuis sa création, 326 espèces d'oiseaux ont fréquenté la Réserve Ornithologique du Teich. La liste de ces espèces est disponible en annexe 2.

3. DÉFINITION DES NOTIONS

3.1. Termes techniques

3.1.1. Indicateurs

En analyse écologique, on parle d'indicateur pour désigner toute statistique permettant de caractériser un aspect d'un phénomène, d'une population ou d'une communauté. Par exemple, on peut citer le sex-ratio (rapport entre le nombre de mâles et le nombre de femelles) ou la durée de halte migratoire. Les indicateurs sont issus de mesures ou d'observations et constituent des synthèses qui permettent de faciliter la communication, l'interprétation et la comparaison entre des périodes ou des lieux. Ils peuvent enfin représenter une aide à la décision dans un processus de gestion.

3.2. Termes thématiques

3.2.1. Groupes taxonomiques et fonctionnels

Les oiseaux qui fréquentent la ROT peuvent être rassemblés en différents groupes. La plupart du temps, nous ferons référence à la systématique pour établir ces groupes. C'est ainsi que nous conserverons intactes les notions d'anatidés, ardéidés, rallidés ou encore laridés, telles qu'elles sont définies dans la systématique phylogénétique.

Pour d'autres groupes en revanche, nous utiliserons une approche plus vernaculaire. Seront ainsi rassemblées dans le groupe des « limicoles » toutes les espèces appartenant aux familles des récurvirostridés, charadriidés et scolopacidés qui fréquentent les littoraux et lagunes et trouvent leur alimentation dans la vase. Par exemple, on peut citer l'Avocette élégante *Recurvirostra avosetta*, le Grand gravelot *Charadrius hiaticula* ou encore le Courlis corlieu *Numenius phaeopus*.



Figure 5 : a. Avocette élégante *Recurvirostra avosetta* (Crédit photo : Mouillet P.)

b. Grand gravelot *Charadrius hiaticula* (Crédit photo : Delarue A.)

c. Courlis corlieu *Numenius phaeopus* (Crédit photo : Fort R.)

De la même manière, nous rassemblerons sous la bannière « rapace » tous les accipitriformes et falconiformes (rapaces diurnes) ainsi que les strigiformes (rapaces nocturnes). Par exemple, le Milan noir *Milvus migrans*, le Faucon hobereau *Falco subbuteo* ou la Chouette hulotte *Strix aluco*.

Enfin, afin de fluidifier le discours, nous nous permettrons une approximation dans la définition du terme « passereau » qui désigne en vérité tous les membres de l'ordre des

passeriformes et uniquement ceux-ci. Nous utiliserons ce terme en y rattachant également l'ensemble des columbiformes, apodiformes, cuculiformes, psittaciformes, piciformes et coraciiformes. En effet, ces espèces, globalement de petite taille et adeptes d'un mode de vie plus discret, ne sont pas aussi bien détectables par contact visuel que les autres groupes abordés. A ce titre, ils seront considérés différemment des autres à l'égard des analyses effectuées, mais au sein de ce groupe seront traités de la même manière.

3.2.2. Espèce patrimoniale

Dans le cadre de ce rapport, est définie comme espèce patrimoniale toute espèce d'oiseau pour laquelle la ROT a été reconnue site d'importance nationale ou internationale pour au moins une année depuis sa création. Les dix-sept espèces présentées dans le tableau ci-dessous remplissent cette condition à l'heure actuelle. Pour des raisons d'archivage partiel, les années d'atteinte de ces seuils ne sont pas systématiquement accessibles.

Tableau 1 : Liste des espèces avifaunistiques patrimoniales de la Réserve Ornithologique du Teich.
(Source : ROT, 2017, modifiée.)

H : Hivernant, M : Migrateur

Nom vernaculaire	Nom scientifique	Seuil d'importance	Année	Statut
Avocette élégante	<i>Recurvirostra avosetta</i>	Internationale		H
Barge à queue noire	<i>Limosa limosa</i>	Internationale	2014	H
Barge rousse	<i>Limosa lapponica</i>	Nationale		H, M
Bécasseau maubèche	<i>Calidris canutus</i>	Nationale		H, M
Bécasseau minute	<i>Calidris minuta</i>	Nationale		H
Bécasseau variable	<i>Calidris alpina</i>	Internationale	2012	H
Canard pilet	<i>Anas acuta</i>	Internationale		H, M
Canard souchet	<i>Spatula clypeata</i>	Nationale		H, M
Chevalier aboyeur	<i>Tringa nebularia</i>	Nationale		H, M
Chevalier arlequin	<i>Tringa erythropus</i>	Nationale		H, M
Chevalier gambette	<i>Tringa totanus</i>	Nationale		H, M
Chevalier guignette	<i>Actitis hypoleucos</i>	Nationale		M
Courlis cendré	<i>Numenius arquata</i>	Nationale		H, M
Courlis corlieu	<i>Numenius phaeopus</i>	Nationale		M
Grand gravelot	<i>Charadrius hiaticula</i>	Internationale	2012	M
Pluvier argenté	<i>Pluvialis squatarola</i>	Nationale		H, M
Spatule blanche	<i>Platalea leucorodia</i>	Internationale		H, M

4. DONNÉES, MATÉRIEL ET MÉTHODES

4.1. Acquisition des données ornithologiques : protocole de comptage.

4.1.1. Présentation orientée du site d'étude

La Réserve Ornithologique du Teich est divisée virtuellement en 18 USN¹ aussi appelées « unités de comptage » identifiées par un nom et un numéro. L'avifaune est dénombrée indépendamment sur chaque unité de comptage.

Le niveau des plans d'eau est maintenu constant au moyen d'ouvrages hydrauliques internes (tuyaux, pompes électriques et thermiques entre les lagunes) et externes (écluses le long de la Leyre et communiquant avec le bassin d'Arcachon) qui permettent d'ajuster les volumes si nécessaire en faisant rentrer de l'eau à marée haute ou sortir de l'eau à marée basse. La hauteur d'eau sur chaque parcelle de la ROT reste ainsi stable à ± 2 cm, quelle que soit la hauteur de la mer à l'extérieur.

Les voies d'accès sont bordées de haies et de pare-vue afin de restreindre le contact visuel entre les oiseaux et les visiteurs et par conséquent, de limiter le stress et le dérangement de l'avifaune par le public. Ces chemins sont jalonnés de 20 cabanes d'observation appelées « observatoires » ou « affûts » et 5 points de vue dégagés. Les oiseaux sont comptés à partir de ces 25 points d'observation.

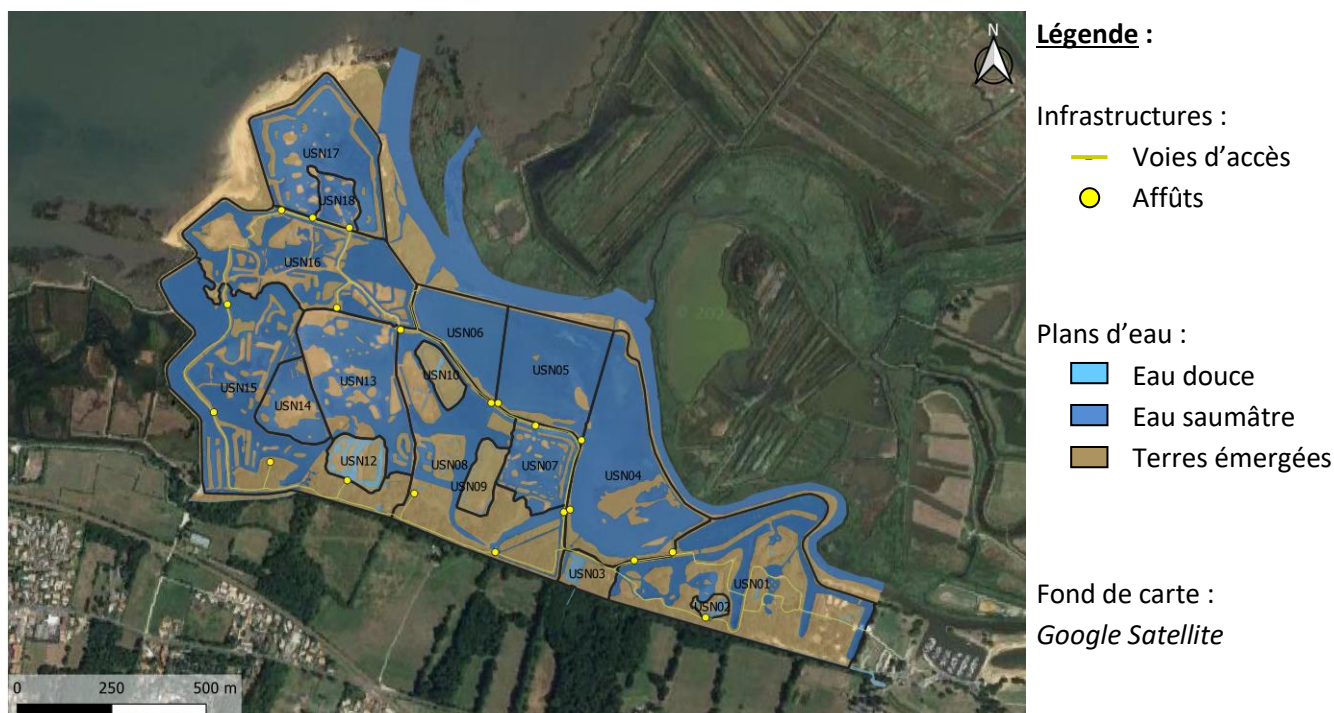


Figure 6 : Cartographie des unités de comptage de la Réserve Ornithologique du Teich.

¹ Unité de Suivi Naturaliste

4.1.2. Matériel et ressources nécessaires au comptage

Les oiseaux sont comptés par 2 à 5 observateurs parmi les techniciens naturalistes et stagiaires de la Réserve Ornithologique du Teich. Les observations sont effectuées au moyen de matériel optique (jumelles et longues-vues), rarement à l'œil nu sur certains secteurs lorsque la proximité des oiseaux le permet. Les déplacements effectués à vélo entre les points d'observation permettent de minimiser le temps de trajet et de fait, le déplacement des oiseaux au sein et autour de la réserve et ainsi de limiter le risque de doublons. Un comptage total de l'avifaune sur la ROT nécessite entre 1h30 et 3h selon le nombre d'observateurs et l'abondance d'oiseaux sur le site. L'abondance de chaque espèce est notée distinctement pour chaque USN.

4.1.3. Choix des dates et heures

L'objectif de ces comptages ornithologiques est d'échantillonner régulièrement l'avifaune fréquentant la ROT. Ceux-ci sont ainsi échelonnés tout au long de l'année, avec une fréquence allant de deux dénombrements par mois entre juin et août, à trois entre septembre et mai. En effet, en raison de leur nidification, les oiseaux se font plus sédentaires durant l'été et leurs effectifs connaissent moins de variations. Le reste de l'année, pratiquer trois comptages mensuels permet d'établir une phénologie plus précise des variations d'effectifs sur la réserve, notamment en période de migration où l'arrivée ou le départ de groupes d'individus peut gonfler ou diminuer rapidement l'effectif global.

Les comptages sont programmés de manière à pouvoir être effectués sur des marées hautes à fort coefficient, c'est-à-dire dans un intervalle de quatre heures centré sur l'heure de pleine mer, aux jours de plus gros coefficient. En effet, les limicoles s'alimentent dans la vase à marée basse, lorsque l'amplitude de l'estran est maximale. Ils sont alors dispersés sur l'ensemble du bassin d'Arcachon. Lorsque la marée remonte, ils se rassemblent sur des zones de quiétude appelées « reposoirs ». Toute la population locale est alors concentrée sur un nombre limité de sites, dans une phase comportementale où elle se montre statique, ce qui rend les conditions de comptage idéales. Grâce à sa gestion hydraulique, la ROT fait partie de ces reposoirs.

L'un de ces deux à trois dénombrements mensuels se situe toujours à proximité du 15 du mois. Ce comptage particulier est coordonné sur l'ensemble du bassin d'Arcachon dans le cadre d'un programme de suivi des limicoles du bassin d'Arcachon (LimiBass), dont les données sont centralisées par la RNN¹ du Banc d'Arguin (Grandpierre M., comm. pers.) et transmise à l'OPNL² dans le cadre du projet de suivi des limicoles côtiers [7](OPNL, 2000). Tous les reposoirs y sont comptés simultanément, moyennant un nombre suffisant d'observateurs, afin d'estimer la population totale présente dans le secteur. L'équipe technique de la Réserve en profite généralement pour compter également le reste de l'avifaune.

¹ Réserve Naturelle Nationale

² Observatoire du Patrimoine Naturel Littoral

4.1.4. Espèces ciblées

Cette méthode de dénombrement étant basée sur l'observation directe d'oiseaux à vue, elle n'est pas adaptée à l'estimation des effectifs de certains taxons. En effet, bien qu'elle se montre efficace sur des espèces fréquentant des milieux dégagés (laro-limicoles, anatidés...) ou se détachant dans le ciel (rapaces), elle se révèle très mauvaise pour évaluer l'abondance des passereaux, oiseaux discrets souvent dissimulés dans la végétation et se faisant plus souvent remarquer à l'ouïe, par leur chant, qu'à la vue.

Les passereaux font l'objet de suivis propres, par points d'écoute (STOC¹-Site [8](LPO² France, 1989)) et par capture (STOC-ROZO [9](CRBPO³, 1989), PHENO [10](CRBPO, 2014)), plus adaptés à estimer effectivement leur abondance et leur diversité. Ainsi ils ne sont pas dénombrés lors de ces comptages, à l'exception de la Gorgebleue à miroir *Luscinia svecica* (dont la sous-espèce *namnetum* est endémique du littoral atlantique français) et du Martin-pêcheur d'Europe *Alcedo atthis*, qui constituent des espèces à enjeux. Seule une information de présence/absence est parfois notée pour certaines autres espèces dites « remarquables » pour la ROT (par exemple, le Torcol fourmilier *Jynx torquilla*). Afin d'éviter tout biais lié à leur échantillonnage lacunaire, les passereaux ne seront pas considérés dans cette étude, exception faite de *L. svecica* et *A. atthis*.



Figure 7 : a. Gorgebleue à miroir blanc *Luscinia svecica namnetum* (Crédit photo : Gillon J.)
b. Martin-pêcheur d'Europe *Alcedo atthis* (Crédit photo : Fort R.)
c. Torcol fourmilier *Jynx torquilla* (Crédit photo : Laucher E.)

4.1.5. Cas particulier des aigrettes, bihoreaux et cormorans

Contrairement aux limicoles, les aigrettes (Aigrette garzette *Egretta garzetta* et Grande aigrette *Ardea alba*) et cormorans (Grand cormoran *Phalacrocorax carbo*), ainsi que le Bihoreau gris *Nycticorax nycticorax*, peuvent continuer de s'alimenter quelles que soient les variations de la marée et ne se rassemblent pas sur les reposoirs. En revanche, ces oiseaux se regroupent à la tombée du jour sur des dortoirs communs qu'ils quittent à l'aube. Ces espèces sont seulement comptées au dortoir, à l'aube ou au crépuscule selon la disponibilité des techniciens. Les autres hérons cependant (Hérons cendré et pourpré *Ardea cinerea* et *A. purpurea*, et Héron garde-bœufs *Bubulcus ibis*), bien qu'ils présentent un mode de vie similaire, ne se présentent pas aux dortoirs. Ils sont donc comptés à marée haute avec les autres espèces.

¹ Suivi Temporel des Oiseaux Communs

² Ligue pour la Protection des Oiseaux

³ Centre de Recherches sur la Biologie des Populations d'Oiseaux

4.1.6. Evolution temporelle des protocoles

Le protocole de comptage présenté dans les paragraphes précédents a été mis en place en 2007 lors de la prise de poste de Claude Feigné, conservateur de la ROT (2007-2019), et pleinement appliqué à partir de 2009. Entre 1980 et 2007, les conditions de comptage dépendaient de la taxonomie des espèces (Fleury A., comm. pers.). Les limicoles étaient comptés quotidiennement afin de saisir les variations drastiques d'effectifs pouvant survenir d'un jour à l'autre, tandis que les autres taxons (anatidés, laridés, ardéidés, grèbes, cormorans), dont les populations sont plus stables à court terme, n'étaient dénombrés qu'une fois par mois aux environs du 15 du mois. Toutes les espèces étaient comptées à marée haute (± 2 h autour de la pleine mer) à l'exception des anatidés comptés entre 10h et midi. Les rapaces n'ont été intégrés aux comptages qu'en 1999.

Les comptages antérieurs à 1980 ne seront pas pris en compte car les limicoles, taxon principal sur lequel se concentre cette étude, n'étaient pas dénombrés.

Tableau 2 : Synthèse de l'évolution des protocoles de comptage en fonction des espèces entre 1973 et 2022.

	1973-1979	1980-1998	1999-2006	2007-2009	2009-2021
Anatidés	Mensuel				Tri-mensuel
Ardéidés	Mensuel				Tri-mensuel
LIMICOLES	Non compté	Quotidien		Mensuel	Tri-mensuel
sauf Bécassine des marais	Mensuel				
Laridés	Non compté	Mensuel			Tri-mensuel
sauf Mouette rieuse	Mensuel				
Ciconiidés	Mensuel				Tri-mensuel
Gorgebleue à miroir	Non compté			Mensuel	Tri-mensuel
Gruidés	Non compté	Mensuel			Tri-mensuel
Martin-pêcheur d'Europe	Non compté			Mensuel	Tri-mensuel
Phalacrocoracidés	Mensuel				Tri-mensuel
Podicipédidés	Non compté	Mensuel			Tri-mensuel
sauf Grèbe castagneux	Mensuel				
Rallidés	Non compté	Mensuel			Tri-mensuel
sauf Foulque macroule	Mensuel				
RAPACES	Non compté		Mensuel		Tri-mensuel
Threskiornithidés	Non compté	Mensuel			Tri-mensuel

4.1.7. Saisie des données

Les données résultant des comptages sont inscrites sur un carnet d'observation de terrain puis reportées et hébergées sur le site de faune-aquitaine.org (URL : <https://www.faune-aquitaine.org/>), base de données participative en ligne gérée par la LPO et antenne régionale de Faune-France.org.

Les effectifs de chaque espèce sont affectés aux unités de comptage sur lesquelles ils ont été observés et associés à des métadonnées relatives aux conditions météorologiques (couverture nuageuse, pluviosité, vent, température), marégraphiques (marée et coefficient de marée) et circadiennes (matin ou après-midi).

La synthèse de ces comptages permet *in fine* d'informer le public à l'aide d'une fiche de résultats, présentant les données du mois par date. Ces fiches sont accessibles sur le site internet de la ROT (URL : <https://www.reserve-ornithologique-du-teich.com/les-oiseaux/tous-les-comptages/>)

4.2. Formalisme des données de comptage

4.2.1. Sélection des données avant export

Les données utilisées au cours de cette étude sont issues de FA¹ et ont été exportées au format texte (.txt) depuis la plateforme. Seules sont exportées les données saisies par l'équipe technique de la Réserve Ornithologique du Teich. Cette présélection présente trois avantages majeurs : tenir une pression d'observation connue et maîtrisée malgré la démocratisation du site et l'augmentation du nombre de contributions par des naturalistes amateurs (voir figure 8 ci-dessous), éviter les doublons liés au contact d'un même individu par plusieurs observateurs distincts, et s'assurer de l'exactitude des données (saisies par le personnel formé et compétent).

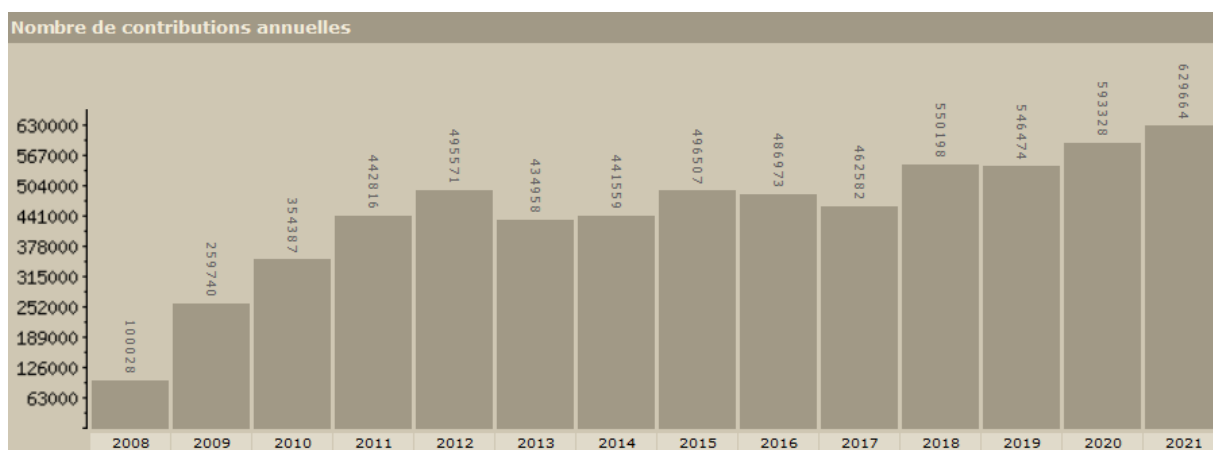


Figure 8 : Nombre annuel d'observations transmises sur Faune-Aquitaine, tous utilisateurs.

(Source : Faune-Aquitaine.org, LPO Aquitaine).

4.2.2. Format des données : principes généraux

Toutes les données d'observation de la ROT sont rassemblées dans un unique tableau. Chaque champ, aussi appelé colonne, correspond à une variable : c'est-à-dire un paramètre susceptible de prendre différentes valeurs (par exemple l'espèce, la date ou encore le nombre d'individus). Chaque ligne représente une observation, c'est-à-dire un contact d'au moins un oiseau d'une seule espèce sur un seul secteur. La figure 9 présente un extrait du jeu de données, accompagné du vocabulaire présenté dans ce paragraphe.

¹ faune-aquitaine.org

Espèce	Date	Commune	Nombre	Commentaires	Nom des variables
Pluvier argenté	16.06.2015	Teich (Le)	2		
Barge à queue noire	16.06.2015	Teich (Le)	90	dont LfBL/a	
Bihoreau gris	16.06.2015	Teich (Le)	5	En vol	Une observation
Oie cendrée	17.06.2015	Teich (Le)	27	MAR2 C2 AM	
Courlis cendré	17.06.2015	Teich (Le)	122	MAR2 C2 AM	
Courlis corlieu	17.06.2015	Teich (Le)	8	MAR2 C2 AM	
Pluvier argenté	17.06.2015	Teich (Le)	6	MAR2 C2 AM	
Pluvier doré	17.06.2015	Teich (Le)	1	MAR2 C2 AM	
Vanneau huppé	17.06.2015	Teich (Le)	5	MAR2 C2 AM	Une observation d'une variable

Un champ = une variable

Figure 9 : Extrait du jeu de données annoté pour illustrer le vocabulaire associé.

4.2.3. Format des données : détail des champs d'intérêt

Seule une partie des champs du tableau de FA présente un réel intérêt dans l'étude menée. Leur liste accompagnée d'un descriptif de chaque champ est disponible dans le tableau 3 ci-dessous.

Tableau 3 : Liste des champs d'intérêt du jeu de données de comptage.

Nom du champ	Descriptif
ID_SIGHTING	Identifiant de l'observation : numéro unique associé à chaque observation. En cas de jonction entre jeux de données, permet de vérifier qu'il n'y a pas de doublons.
LATIN_SPECIES	Nom latin de l'espèce d'oiseau.
FAMILY_NAME	Famille de l'oiseau.
DATE	Date de l'observation.
TIMING	Heure de l'observation.
PLACE	Lieu de l'observation : unité de comptage ou autre localisation.
MUNICIPALITY	Commune de l'observation.
COUNTY	Département de l'observation.
COUNTRY	Pays de l'observation.
COORD_LAT	Coordonnée géographique (latitude) du lieu d'observation.
COORD_LON	Coordonnée géographique (longitude) du lieu d'observation.
ALTITUDE	Altitude de l'observation.
ESTIMATION_CODE	Précision du nombre d'individus comptés (exact, supérieur à, environ ou non compté).
TOTAL_COUNT	Nombre d'individus comptés.
COMMENT	Commentaires sur l'observation : ici sont inscrites les informations de marée, coefficient de marée, météo... et autres informations complémentaires.

Les champs restants sont principalement des métadonnées liées à l'ajout et à l'export des données, à leur confidentialité ou à la présence de média (photographie, enregistrement sonore...). S'ils ont leur utilité dans l'hébergement d'une base de données en ligne, ils sont superflus pour les analyses effectuées dans ce projet.

Le jeu de données manipulé dans ce travail est initialement composé de 143 043 observations sur 45 variables.

4.3. Autres données utilisées

4.3.1. Données SIG¹

En complément des données de comptages, ce travail d'analyse a nécessité à différents niveaux l'utilisation de plusieurs sources de données d'information géographique, notamment pour le calcul de certains indicateurs ou pour la production de documents cartographiques sur la répartition des espèces sur la Réserve.

Les données géographiques collectées dans le cadre de cette analyse sont listées ci-dessous :

- Délimitation de la ROT et des unités de comptage [4](ROT, 2017).
- Cartographie des habitats de la ROT : Codes CAHAB² [11](Natura2000), EUNIS³ [12](Agence Européenne de l'Environnement), CORINE⁴ Biotopes [13](Corine, 1991) (CBNSA, 2021).
- Aires mondiales de répartition des 76 espèces d'oiseaux les plus communément observées sur la ROT [14](BirdLife International, 2021).
- Carte mondiale des températures mensuelles moyennées sur la période 1970-2000, résolution 30 km [15](Fick S.E. & Hijmans R.J., WorldClim, 2017).
- Topographie LIDAR⁵ de la ROT (PNRLG, 2021 ; SIBA⁶, 2005 & 2016).

4.3.2. Données sur la biologie des populations d'oiseaux

La fréquentation de la ROT par les oiseaux est très soumise à la saisonnalité. Différentes espèces occupent le site selon la saison et la phase de leur cycle biologique, propre à chacune. Pour cette étude, on distingue trois grandes phases du cycle biologique des oiseaux : hivernage, migration (prénuptiale et postnuptiale) et reproduction. Au sein d'une même espèce, les individus qui fréquenteront la Réserve en migration et en hivernage, par exemple, seront issus de différentes populations et n'utiliseront pas le site dans le même objectif : halte temporaire pour les uns, séjour de longue durée pour les autres.

Pour différencier au mieux ces populations, nous avons eu recours aux périodes de nidification, de migration et d'hivernage telles qu'elles sont renseignées dans l'Atlas des oiseaux nicheurs d'Aquitaine [16](Theillout A., LPO, Delachaux & Niestlé, 2015) et de l'Atlas des oiseaux migrateurs et hivernants d'Aquitaine [17](LPO, MNHN⁷, Patrimoines Naturels, 2020).

4.3.3. Données historiques climatiques et marégraphiques

Enfin, ce projet d'étude a nécessité des données environnementales historiques afin de comparer l'évolution de certains indicateurs aux paramètres avec lesquels ils devaient être mis en relation. Nous avons ainsi entrepris la collecte et retranscription manuelle des prédictions et

¹ Systèmes d'Information Géographique

² Cahiers d'Habitats

³ European Nature Information System

⁴ Coordination de l'Information sur l'Environnement

⁵ Light Detection and Ranging

⁶ Syndicat Intercommunal du Bassin d'Arcachon

⁷ Muséum National d'Histoire Naturelle

rétroprédictions marégraphiques issues des modèles de calcul du SHOM¹ (<https://maree.shom.fr/>) afin d'obtenir, pour chaque jour entre le 1^{er} janvier 1980 et le 31 décembre 2011, les heures de pleine mer et coefficients de marée associés à la station marégraphique de la Jetée d'Eyrac (Arcachon, 33), la plus proche de la ROT géographiquement.

Afin de mettre en relation l'évolution des communautés d'oiseaux au fil des années avec le dérèglement climatique, l'acquisition des températures moyennes mensuelles a également été entreprise pour chaque année entre 1980 et 2021 pour la station météorologique de Cazaux (La-Teste-de-Buch, 33), la plus proche de la ROT géographiquement.

4.4. Logiciels employés

L'essentiel du travail d'analyse a été conduit à l'aide du logiciel R (version 4.0.2, © The R Foundation, 2020) sous l'environnement de travail RStudio. La liste des packages utilisés ainsi que leur référence est disponible en annexe 3. Les données géoréférencées ont principalement été manipulées sous QGIS (version 3.16.5, QGIS Development Team, 2022).

4.5. Méthodes d'analyse

Le travail d'analyse de données se découpe en trois phases majeures. Tout d'abord, une structuration préalable, appelée « stratification », permet de mettre en formes le jeu de données afin principalement de sélectionner les observations d'intérêt et d'homogénéiser les formulations de manière à le rendre exploitable.

Vient ensuite l'étape des analyses à proprement parler : calcul d'indicateurs, estimation de l'influence des variables d'intérêt, productions graphiques et cartographiques... Ici, le travail d'analyse se découpe en trois thèmes majeurs qui structureront la suite de ce rapport :

- **Thème I** : « Dynamiques saisonnières et interannuelles des populations d'oiseaux ». Il visera à comprendre comment chacune des 17 espèces patrimoniales évolue au cours du temps sur la Réserve Ornithologique du Teich. L'espèce a-t-elle augmenté, décliné ? Quelle phénologie observe-t-on ? Quand se situent les pics d'abondance ?
- **Thème II** : « Indices écologiques et disparités spatiales ». Il s'agira de documenter la diversité d'espèces sur les différents secteurs de la ROT ainsi que d'identifier quelles sont les USN qui présentent le plus d'intérêt au regard de l'avifaune. Certaines unités présentent-elles une meilleure diversité que d'autres ? Les communautés sont-elles équilibrées ? Comment les 17 espèces patrimoniales se positionnent-elles dans cette répartition ? Varie-t-elle au fil des saisons ?
- **Thème III** : « Influence des facteurs environnementaux sur l'avifaune ». Ce dernier thème cherchera à expliquer comment les effectifs observés des 17 espèces patrimoniales peuvent être influencés par les paramètres climatiques et marégraphiques. Les effets de la marée, du coefficient de marée, de la demi-journée et des conditions météorologiques seront abordés.

Les analyses effectuées feront enfin l'objet d'une critique accompagnée de validations statistiques, afin de se prémunir contre l'émission de conclusions erronées.

¹ Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

L'intégralité de ce processus est automatisée et consignée dans un ensemble de scripts codés sous langage R (fichiers .R), accessibles à cette adresse : https://github.com/Romane-F/Analyses_Teich.

4.5.1. Exploration et préparation des données

Tout travail d'analyse est systématiquement précédé par une phase dite « d'exploration » du jeu de données. Celle-ci consiste à consulter le jeu de données et à s'en imprégner, afin de comprendre sa structure, comment le manipuler ainsi que l'information qui va pouvoir en être extraite.

Les phases d'exploration et de structuration sont fondamentales pour assurer le bon fonctionnement des étapes suivantes et s'épargner les écueils liés à d'éventuelles erreurs dans le jeu de données. L'étape de préparation vise à sélectionner les données d'intérêt en éliminant les éléments aberrants, mais elle permet également d'accéder à des informations inexploitable en l'état (par exemple, renseignées dans un format inadapté).

Ici, nous avons initié notre phase de structuration par la gestion des champs du tableau que nous manipulons. Les champs existants ont été nommés à l'aide de la première ligne du tableau (qui sert d'en-tête et disparaît donc du jeu de données), et nous avons procédé à la création de variables supplémentaires déduites des valeurs renseignées afin de faciliter la manipulation. Par exemple, la date est décomposée en trois champs contenant l'année, le mois, le numéro du jour dans le mois (quantième mensuel) et dans l'année (quantième annuel). Certains de ces champs nouvellement créés demeurent vides durant cette première étape d'initiation et ne seront remplis qu'ultérieurement dans la préparation des données : c'est le cas de toutes les variables qui hériteront des informations contenues dans le champ de commentaires.

Tableau 4 : Liste et descriptif des champs créés durant la préparation des données.

Nom du champ	Descriptif
YEAR	Année de l'observation, extraite de la date.
MONTH	Mois de l'observation, extrait de la date.
MDAY	Quantième mensuel.
YDAY	Quantième annuel.
USN	Identifiant de l'unité de comptage, extrait du lieu.
DEMIJOURNEE	Demi-journée dans laquelle se situe l'observation.
MAREE	Niveau de la marée au moment de l'observation.
COEFF	Coefficient de marée au moment de l'observation.
COUV	Couverture nuageuse au moment de l'observation.
PRECIP	Précipitations au moment de l'observation.
BRUME	Présence/absence de brume au moment de l'observation.
TEMP	Température au moment de l'observation.
ETAT_EAU	Etat des plans d'eau (gel, assec...) au moment de l'observation.
VENT_FORCE	Force du vent au moment de l'observation.
VENT_DIRECTION	Direction du vent au moment de l'observation.

Nous opérons ensuite une sélection des données sur différents critères afin d'écarter de l'analyse toutes les données hors de propos. Nous ne conservons ainsi que les observations effectuées sur la Réserve Ornithologique du Teich entre le 1^{er} janvier 1980 et le 31 décembre 2021 (l'année 2022 n'étant pas achevée). Nous effectuons une vérification de la qualité des données. Au

cours de celle-ci, nous écartons toutes les observations d'oiseaux dont l'espèce n'a pas pu être déterminée. Pour les espèces dont l'identification peut se révéler complexe sur le terrain, FA propose d'entrer la donnée avec la mention « indéterminé ». Par exemple, un goéland dont l'espèce n'a pu être distinguée avec certitude sera référencé sous le nom vernaculaire « Goéland indéterminé », avec pour nom latin « *Larus sp. (magna)* ». Ces observations incertaines ne sont pas pertinentes pour la production d'indicateurs et sont donc écartées de l'analyse. Enfin, sont écartées toutes les observations pour lesquelles le nombre d'oiseaux n'a pas été compté, identifiées par la présence d'un « x » dans le champ *ESTIMATION_CODE* du jeu de données.

A l'issue de cette étape, 4 568 observations ont été écartées du jeu de données, soit environ 3,2 % du total.

La dernière grande étape de la phase de structuration consiste en l'extraction et la stratification des informations contenues dans les commentaires. En effet, la plateforme de saisie de FA ne permet pas de renseigner dans des champs spécifiques certaines informations telles que la marée ou les conditions météorologiques, qui sont alors concentrées dans les commentaires des observations. Extraire ces informations revient à créer des champs qui leur seront propres et à s'assurer qu'elles y seront correctement affectées. Ici, ce processus est nécessaire afin d'accéder aux informations relatives à la marégraphie (temps séparant l'observation de la pleine mer et coefficient de marée) et aux conditions météorologiques (température, couverture nuageuse, précipitations, vent et visibilité). En l'occurrence, nous avons créé les champs nécessaires dès le début du travail de préparation, il convient donc uniquement de les remplir en y affectant correctement chaque information.

La stratification consiste à classer les données en différents groupes, sur un ou plusieurs critères, afin de constituer des ensembles comparables entre eux. Par exemple, les conditions météorologiques, appréciables uniquement qualitativement, sont propices à ce type de manipulation. Les classes définies dépendent toutefois de la nature des données brutes disponibles. En l'occurrence, une partie des informations est déjà stratifiée dès la saisie des données, selon le protocole établi par Feigné C. (conservateur de la ROT entre 2007 et 2019) et renforcé par Forchelet C. (conservateur de la ROT entre 2019 et 2022). Le détail des classes définies lors de la stratification est disponible en annexe 4.

Cette phase de préparation s'achève par la sélection des colonnes d'intérêt, de manière à faciliter la lecture et le stockage du tableau résultant. Enfin, celui-ci est sauvegardé pour pouvoir être réutilisé sans avoir à réitérer tout le processus à partir du tableau initial. La figure 10 propose une synthèse des processus et résultats intermédiaires de la phase de préparation.

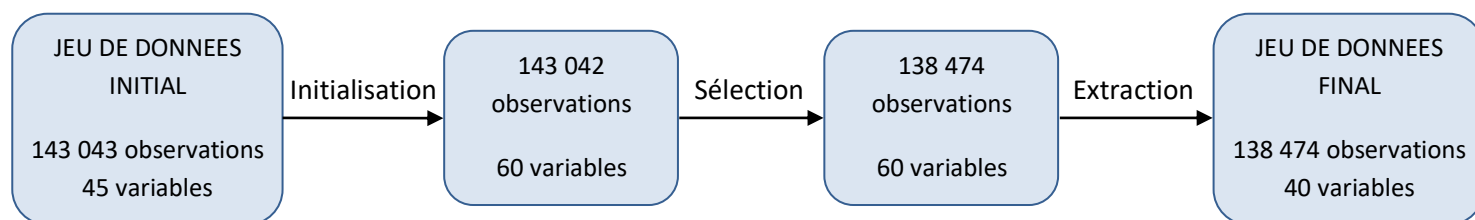


Figure 10 : Chaîne synthétique des processus et résultats intermédiaires de la phase de préparation du jeu de données.

Pour certaines analyses, nous utilisons parfois des données complémentaires issues d'autres sources, telles que les informations relatives au cycle biologique ou à la taxonomie. De même, certains indicateurs ne nécessiteront l'utilisation que d'une partie du jeu de données total. Dans ces cas, un tableau temporaire, issu du jeu de données complet, sera créé et utilisé le temps de la production de cet indicateur.

4.5.2. Précision : les changements de protocole

Lorsque l'on souhaite procéder une étude sur le long terme, il est essentiel que les données soient standardisées, c'est-à-dire que le protocole d'acquisition et de saisie soit stable dans le temps. Autrement, il est impossible de comparer des données issues de protocoles distincts, car les interprétations qui en découleraient pourraient être biaisées par le changement de méthode.

Nous avons évoqué précédemment que le protocole de comptage avait changé plusieurs fois au cours de la période d'étude. Une étape intégrale du travail de préparation est donc consacrée à l'homogénéisation a posteriori des données de manière à les rendre comparables en s'affranchissant des biais.

Pour cela, nous avons retenu les conditions qui motivent la programmation d'un comptage avec le protocole actuel et nous les avons appliquées pour sélectionner les données anciennes. Nous n'avons ainsi conservé que les données qui répondraient à ce protocole s'il avait été appliqué à l'époque. Autrement dit, parmi les jours de comptage entre 1980 et 2008, nous avons sélectionné jusqu'à trois dates par mois dont les données seraient analysées, selon les critères suivants :

- La marée haute doit être entre 6h30 et 17h30 d'avril à septembre, ou entre 7h30 et 17h30 d'octobre à mars, afin de s'assurer une visibilité correcte.
- L'une des trois dates doit se situer entre le 10 et le 20 du mois concerné.
- Les coefficients de marée sont maximisés.
- Deux dates retenues doivent être espacées d'au moins 5 jours et, lorsque les coefficients de marée le permettent, s'articuler dans des décades différentes.

Nous procédons ainsi car nous avons une bonne connaissance de la structure des données anciennes et qu'elles le permettent pour l'analyse des limicoles. Dans le cas des anatidés, pour lesquels nous ne disposons que d'une donnée de comptage mensuel, nous effectuerons la manœuvre inverse : nous sélectionnerons dans les données récentes la date de comptage la plus proche du 15 du mois, afin de nous conformer au protocole historique.

Toutefois, les observations qui ne s'y conforment pas ne sont pas écartées du jeu de données final. En effet, elles pourront être utilisées dans le calcul de certains indicateurs qui ne sont pas dépendants de la temporalité, et pour lesquels des écarts au protocole actuels peuvent être avantageux (par exemple, la comparaison des conditions marégraphiques prévues par ce protocole avec d'autres).

4.5.3. Analyse, production des indicateurs et validation

4.5.3.1. Thème I : Dynamiques saisonnières et interannuelles des populations

Dynamiques interannuelles des populations

Les effectifs des espèces patrimoniales observés lors des comptages sont moyennés afin d'obtenir une unique valeur par période biologique et par année. Les périodes biologiques définies sont l'hivernage, la migration (prénuptiale et postnuptiale confondues), et la reproduction ou estivage. Les tendances interannuelles sont représentées graphiquement pour chacune de ces quatre périodes de manière à différencier les évolutions de chacune des sous-populations, et affichées sur un unique graphique par espèce afin de faciliter les comparaisons. L'objectif de cette étape est de visualiser les variations de populations et de ne procéder qu'à une analyse descriptive, les populations étant généralement bien trop variables au sein même d'une année ou d'un mois pour pouvoir en tirer des conclusions statistiques robustes.

Phénologie saisonnière des populations

Afin de comprendre comment les effectifs des 17 espèces patrimoniales varient au cours de l'année, nous compilons les résultats de comptage de plusieurs années afin d'établir un modèle « d'année-type ». Nous ne conservons que les comptages des dix dernières années (2012-2021) afin que ce modèle approche autant que possible les conditions actuelles et ne soit pas influencé par d'éventuels changements dans la phénologie de migration, qui relèveraient d'autres paramètres. Les dix années de comptages sont superposées à l'aide des quantiles annuels des jours de comptage (le jour de décalage lié aux années bissextiles est considéré comme négligeable compte tenu des variations intrinsèques). Les comptages sont modélisés par une loi dite de quasi-Poisson, c'est-à-dire une loi de Poisson incluant un paramètre de surdispersion. D'après la loi de Poisson, la probabilité lors d'un comptage que k individus de l'espèce X soient observés suit la loi suivante :

$$P(X = k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda}$$

où λ est un nombre réel positif. Si cette loi prévoit initialement que l'espérance et la variance soient toutes deux égales à λ , la loi de quasi-Poisson quant à elle tolère une surdispersion, c'est-à-dire une variance supérieure à la moyenne.

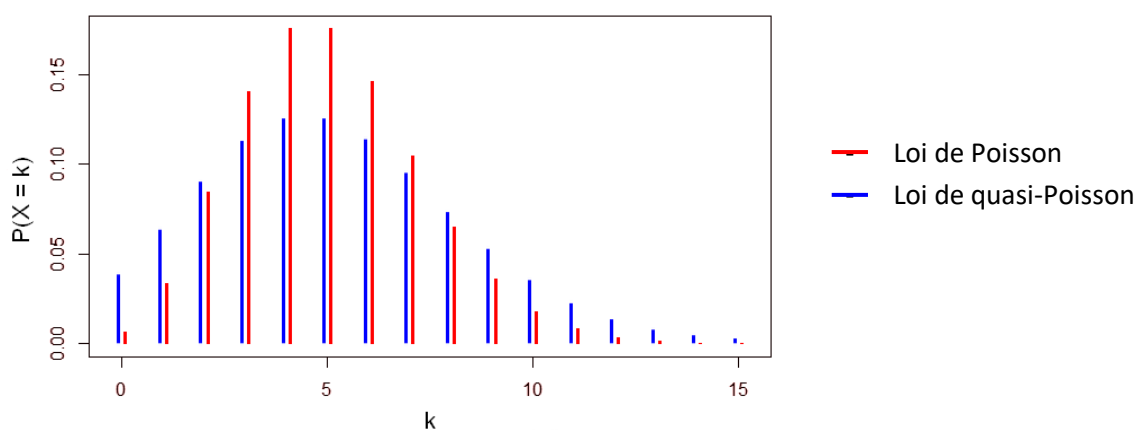


Figure 11 : Comparaison des lois de Poisson ($V = E = \lambda$) et quasi-Poisson ($E = \lambda, V = 2\lambda$) à $\lambda = 5$.

La dynamique saisonnière de chaque espèce est ensuite modélisée et interpolée entre chaque comptage à l'aide d'un GAM¹ appliqué en tenant compte de la surdispersion de quasi-Poisson et les intervalles de confiance sont estimés à 95%. Néanmoins, ces derniers ne signifient pas que 95% des comptages se trouvent dans l'intervalle, mais bien que compte tenu des résultats des comptages, la moyenne à chaque instant a 95% de chances de se situer dans l'intervalle calculé.

Une représentation graphique est enfin effectuée afin de visualiser cette phénologie migratoire, via les périodes de présence et pics d'abondance de chaque espèce au cours de l'année. Celle-ci exprime l'abondance en fonction du quantième annuel, et fait figurer à la fois le GAM et les comptages réels.

4.5.3.2. Thème II : Indices écologiques et disparités spatiales

Occupation des unités de comptage par les espèces patrimoniales

La répartition de chaque espèce patrimoniale sur la ROT a été décrite en analysant comment chacune de ces espèces occupait les différentes USN au cours de l'année. Deux approches ont été adoptées. La première, espèce-centrée, s'intéresse à la manière dont chaque espèce patrimoniale occupe chaque unité de comptage afin d'identifier des espèces généralistes ou spécialistes, ainsi que de constater d'éventuels changements d'occupation au cours d'une année. La seconde, site-centrée, évalue l'attractivité de chaque USN pour les oiseaux d'eau en considérant la densité moyenne d'oiseaux qu'elle accueille lors de chaque saison biologique, toutes espèces confondues.

Indices de diversité α

La diversité avifaunistique interne à chaque unité de comptage, aussi appelée diversité α , a été estimée via le calcul de plusieurs indices écologiques. La richesse spécifique S , égale au nombre d'espèces présentes dans l'USN, a été calculée. De la même manière, les indices de biodiversité de Shannon H' et de Simpson D , permettant chacun d'évaluer la diversité écologique en tenant compte à la fois de la richesse spécifique et de l'équilibre entre les abondances de chacune de ces espèces. Bien que les deux indices aient été calculés, seul l'indice de Shannon sera conservé dans les analyses. En effet, de par sa formule :

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \log(p_i)$$

avec i une espèce du milieu d'étude et p_i la proportion d'individus de cette espèce par rapport au nombre total d'individus, l'indice de Shannon accorde plus de poids que l'indice de Simpson aux espèces rares. Or, nous manipulons des données de comptage de limicoles principalement, dont les groupes peuvent être de taille très variables d'une espèce à une autre. Par exemple, un groupe de 100 Bécasseaux variables *C. alpina* serait de petite taille, alors qu'un groupe de 100 Chevaliers guignettes *A. hypoleucos* serait colossal. Il s'agit de différences comportementales entre les espèces indépendantes de l'attractivité de l'USN. Ainsi, nous ne souhaitons pas rajouter de l'impact par le choix de la formule de calcul à cette prédominance inhérente à certaines espèces et préférons augmenter le poids des espèces observables en plus petits effectifs.

¹ Generalized Additive Models (i.e. Modèle Additif Généralisé)



*Figure 12 : a. Vol de Bécasseaux variables Calidris alpina (Crédit photo : Laucher E.)
b. Chevalier guignette Actitis hypoleucos (Crédit photo : De Waële C.)*

Nous considérons pour ces indices écologiques l'ensemble des espèces contactées au moins une fois par l'équipe technique au cours d'un comptage depuis la création des USN en 2009. Les indices écologiques sont calculés quatre fois sur chacune des 18 unités de comptage, aux périodes de nidification (mai-juillet), d'hivernage (décembre-février) et de transition (août-novembre et mars-avril), ainsi qu'en considérant l'ensemble des comptages de l'année. Le même processus est répété pour évaluer l'évolution interannuelle de ces indices de diversité en calculant chaque indice pour chaque année depuis 2009 sur l'intégralité de la Réserve Ornithologique du Teich.

Les résultats sont visualisés sous la forme de diagrammes en barre.

Indice de diversité β et classification des unités de comptage

A nouveau, nous considérons dans le calcul de cet indice l'ensemble de la communauté d'oiseaux observée sur la Réserve depuis 2009. L'objectif est ici d'évaluer à quel point les communautés qui peuplent deux unités de comptage distinctes peuvent être similaires ou différentes. Pour cela, nous calculons l'indice de Jaccard J tel que :

$$J(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}$$

où A et B sont deux sites distincts, $J(A, B)$ l'indice de Jaccard entre ces deux sites, $|A \cap B|$ le nombre d'espèces communes aux deux sites et $|A \cup B|$ le nombre d'espèces total des deux sites. L'indice de Jaccard correspond donc à la proportion d'espèces partagées par rapport au nombre d'espèces total. Plus cette proportion est élevée, plus les communautés sont supposées similaires. A l'inverse, la distance de Jaccard $J_\delta = 1 - J$ permet donc d'estimer les dissimilarités entre deux communautés.

Pour ces calculs, les unités de comptage « Roselière Est », « Roselière Centre » et « Roselière Ouest », respectivement les USN 09, 10 et 11, sont intégrées à l'USN 08 « Marais Centre ». En effet, peu de données sont affectées à ces trois roselières, car les oiseaux d'eau qui les fréquentent sont détectés lors des comptages lorsqu'ils en sortent et circulent en périphérie. Ils sont alors généralement notés sur l'USN 08, marais dont les roselières sont des enclaves. Par cohérence et puisque la plupart des données de ces unités sont déjà affectées à Marais Centre, nous achevons le processus en y affectant celles qui restent.

Une fois les distances de Jaccard calculées deux à deux pour chaque paire d'USN, le degré de similarité des USN entre elles est hiérarchisé par CAH¹ en utilisant la méthode de Ward afin d'établir des groupes d'unités de comptage similaires dans les communautés d'oiseaux qui les fréquentent. Ces groupes sont confrontés à une classification par la méthode des K-means. Cette seconde approche non hiérarchisée permet de confirmer ou non l'exactitude des groupes établis par la CAH.

Les résultats de la CAH sont visualisés à l'aide d'un dendrogramme et les distances de Jaccard calculées sont hébergées dans un tableau exporté au format CSV.

4.5.3.3. Thème III : Influence des facteurs environnementaux sur l'avifaune

Influence des conditions marégraphiques, météorologiques et circadiennes

Pour cette partie, nous cherchons à comprendre quels sont les paramètres environnementaux qui peuvent conditionner les effectifs des espèces patrimoniales sur la ROT. Nous nous concentrons donc à nouveau sur les 17 espèces patrimoniales et considérons l'ensemble de la période d'étude. Nous avons évoqué précédemment que la standardisation des méthodes de comptage différait selon les taxons : à ce titre, les paramètres que nous pourrions analyser diffèreront également.

Les informations disponibles sur les paramètres environnementaux sont stratifiées en classes ordinales. Nous pouvons évaluer l'effet de ces classes en comparant les comptages entre les différents groupes. Pour cela, nous réalisons plusieurs ANOVA² afin d'estimer séparément l'influence de chaque paramètre parmi : niveau de la marée, coefficient de marée, demi-journée et chacune des variables météorologiques renseignées. Nous privilégions les ANOVA à un facteur plutôt que les ANOVA à plusieurs facteurs pour deux raisons. Tout d'abord, l'indépendance des variables ne peut être garantie (par exemple, les forts coefficients de marée se situent généralement entre 7h et 8h, auquel cas il existe une interdépendance entre coefficient de marée et demi-journée). Et deuxièmement, les groupes intervenant dans une ANOVA à deux ou trois facteurs seraient de taille insuffisante pour permettre une quelconque interprétation (l'hypothèse de normalité des résidus ne serait pas vérifiée). Nous séparons toutefois les calculs par saison afin d'appréhender d'éventuelles différences comportementales entre les populations estivantes, hivernantes et de passage et d'assurer l'homogénéité des résidus.

Intrinsèquement, les données de comptage ne suivent pas une loi normale. Nous les modélisons donc à nouveau par une loi de quasi-Poisson, et nous appliquons nos ANOVA à ce modèle. Lorsque l'ANOVA présente des résultats significatifs, un test complémentaire de Tukey est effectué pour identifier quels sont les groupes significativement différents. Nous ne calculons les ANOVA et tests de Tukey que dans les cas où nous disposons d'au moins 15 observations par groupe afin d'éviter la surinterprétation engendrées par des échantillons trop faibles et non représentatifs. Dans les cas où certains groupes contiendraient moins de 30 observations, des réserves seraient émises sur l'interprétation.

Pour la plupart des espèces, une partie des données de comptage a dû être écartée. En effet, comme il le sera détaillé dans la partie 4. Résultats, certaines espèces connaissent des variations

¹ Classification Ascendante Hiérarchique

² Analysis of Variance (i.e. Analyse de la Variance)

interannuelles colossales qui écrasent artificiellement les variations engendrées par les paramètres étudiés. Notamment, il serait absurde d'intégrer dans l'étude des paramètres environnementaux des données datant d'une période où l'espèce concernée ne fréquentait pas la ROT. Pour éviter ces biais, seules les années où l'abondance moyenne d'une espèce atteignait au moins 20% de l'abondance moyenne de cette espèce sur l'ensemble de sa période de présence ont été conservées. Cette étape préalable permet d'assurer une homogénéité dans le jeu de données et d'assurer la normalité des résidus.

Les résultats sont visualisés sous la forme de *box plots* (« boîtes à moustache »). Un point correspondant à chaque observation y est superposé afin de visualiser la quantité de données qui a permis d'effectuer le calcul.

Influence du dérèglement climatique

L'influence du dérèglement climatique sur le comportement des populations d'oiseaux est un phénomène scientifiquement établi [18](Devictor & al., 2008). L'avifaune sous nos latitudes se fait de plus en plus septentrionale en quête de températures plus clémentes, ce qui engendre un changement de composition des communautés, qui transitent peu à peu vers des ensembles dominés par des espèces plus méridionales.

Afin d'identifier l'effet précis du changement climatique sur la ROT, mais également d'évaluer si les mesures de gestion peuvent y présenter un frein, nous avons utilisé la méthode de Gaüzère & al. (2020)[19] de calcul de l'Indice Thermique des Communautés en tant qu'indicateur de réponse des communautés à la hausse des températures. Le CTI¹ est un indice pondéré qui s'exprime ainsi :

$$CTI = \frac{\sum_{i=1}^n STI_i N_i}{N}$$

avec i une espèce du site d'étude, N_i l'effectif de cette espèce, N l'effectif total de l'ensemble des espèces et STI l'indice thermique spécifique. Autrement dit, le CTI vaut la moyenne des STI ² pondérée par les effectifs. Le STI d'une espèce est égal à la moyenne des températures de son aire de répartition. Il peut être calculé pour les aires de nidification et d'hivernage.

Dans le but de calculer le CTI de l'avifaune du Teich, les STI de chacune des 76 espèces contactées plus de 100 fois ont été calculés à l'aide des cartes de distribution fournies par BirdLife International [14] (un exemple est présenté en fig. 6) et des cartes de températures moyennes mensuelles issues de WorldClim [15]. Une exception a été faite pour les Goélands argenté *Larus argentatus*, leucophée *Larus michahellis* et pontique *Larus cachinnans*, autrefois considérés comme une espèce unique [20](Crochet & al., 2002). Dans le jeu de données, la distinction entre *L. argentatus* et *L. michahellis* se fait à partir de 2003 et crée une rupture dans la série temporelle. Afin de ne pas créer de biais lié à l'apparition soudaine d'une espèce qui a pourtant toujours fréquenté le site, ces goélands ont été rassemblés sous l'appellation « *Larus magna sp* ».

¹ Community Temperature Index (i.e. Indice Thermique des Communautés)

² Species Temperature Index (i.e. Indice Thermique Spécifique)

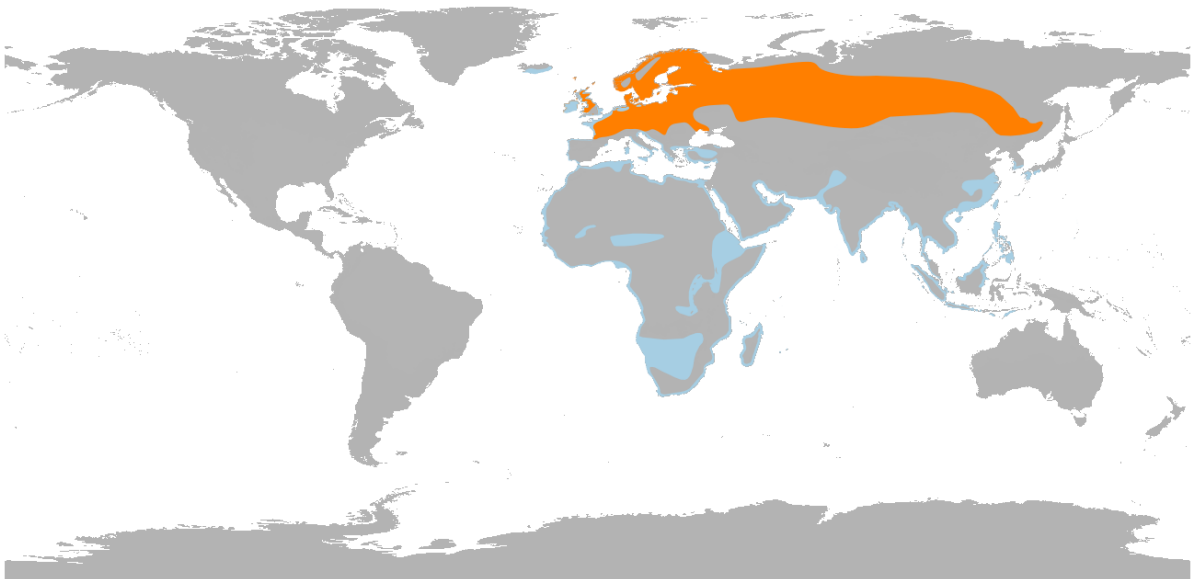


Figure 13 : Aires mondiales de nidification (en orange) et d'hivernage (en bleu) du Courlis cendré N. arquata. (source : BirdLife International, 2020).

La température moyenne sur la saison a été obtenue en moyennant les températures des trois mois du cœur de saison : décembre, janvier et février pour l'hivernage, et mai, juin et juillet pour la nidification.



Figure 14 : Carte mondiale des températures moyennes (1970-2000) en période de nidification (résolution 30x30 km, source des données : WordClim, 2017).

Le CTI est calculé pour chaque année entre 1980 et 2021 et ses variations sont étudiées. Les intervalles de confiance sont calculés par bootstrap, sur 100 itérations, en écartant aléatoirement entre une et la moitié des espèces considérées. Une régression linéaire est appliquée sur les tronçons où son application est pertinente.

Enfin, les contributions de chaque espèce à la variation du CTI sont étudiées afin d'identifier quelles sont les espèces qui dominent ces variations. Des classes sont effectuées selon la biologie des espèces (cycles migratoires, taxonomie) et selon le positionnement de leur STI par rapport au CTI.

L'évolution du CTI est représentée par un nuage de points, reliés pour plus de visibilité, et les intervalles de confiance figurent en rubans autour de celui-ci. Les contributions seront présentées sous la forme d'un diagramme en barres horizontal.

Les effets de la gestion seront appréciés qualitativement au regard de ce qui apparaît comme une anomalie, afin de tenter d'expliquer des variations inattendues.

5. RÉSULTATS

Dans cette partie, nous effectuerons simultanément la présentation et l'interprétation des résultats. Les résultats les plus marquants seront présentés et analysés en détail dans le corps du rapport. Afin de faciliter la lecture, les autres graphiques figureront en annexes.

5.1. Thème 1 : Tendances et évolution temporelle de la population

5.1.1. *Evolution interannuelle des effectifs des espèces patrimoniales au cours de la période d'étude*

Les figures relatives à la dynamique interannuelle des espèces patrimoniales sont disponibles en annexe 5. Certaines d'entre elles, que nous discuterons plus en détail, sont intégrées dans le corps du rapport.

Les graphiques présentés dans cette partie retracent les effectifs moyens, pour chaque année de la période étudiée, de chacune des 17 espèces patrimoniales. Trois courbes sont représentées sur chaque graphique correspondant à l'effectif présent lors de chaque saison biologique : on différencie ainsi les individus présents lors de la période d'hivernage, de migration et de reproduction. Il est à noter qu'un individu présent en période de reproduction n'est pas forcément un individu reproducteur : il peut aussi s'agir d'un oiseau qui a pris de l'avance ou du retard sur sa migration, d'un phénomène d'erratisme ou de dispersion des jeunes, ou encore d'un individu estivant qui n'aura pas mené à terme sa migration et aura passé l'été sur le site sans y nicher... En effet, à l'exception de l'Avocette élégante *R. avosetta*, nicheuse chaque année depuis 2013, aucune des espèces patrimoniales n'est nicheuse sur la ROT et l'intérêt national ou international du site est reconnu pour la période d'hivernage. Il convient donc d'être vigilant sur l'interprétation du nombre d'individus présents en période de nidification, qui ne représente pas un nombre d'individus nicheurs.

Lorsque l'on procède à une vue d'ensemble sur l'intégralité des espèces étudiées, le premier élément marquant est une tendance générale à l'augmentation : 13 espèces sur 17 semblent présenter une nette augmentation de leurs effectifs sur la période 1981-2021 pour au moins une des trois saisons biologiques. En particulier, la Barge à queue noire *L. limosa*, le Courlis cendré *N. arquata* ou encore l'Avocette élégante *R. avosetta* voient leurs effectifs excéder les 600 individus hivernant sur le site en 2020 alors qu'ils étaient absents des comptages en 1981.

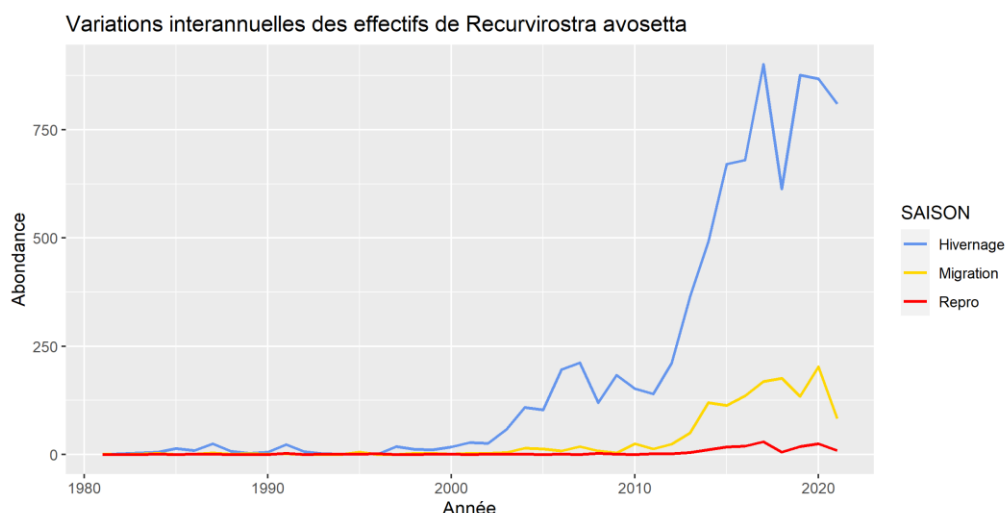


Figure 15 : Variations interannuelles des effectifs d'Avocette élégante *R. avosetta* entre 1981 et 2021

A contrario, le Canard pilet *A. acuta* voit ses effectifs moyens diminuer au cours de la période d'étude, bien qu'ils semblent se stabiliser sur les 10 dernières années.

Pour les 3 espèces restantes, une analyse graphique ne permet pas de dégager de tendances nettes sur la période étudiée. C'est le cas du Chevalier guignette *A. hypoleucos* dont les tendances éventuelles sont masquées par une forte variabilité interannuelle, mais également des Bécasseaux variable *C. alpina* et minute *C. minuta* qui semblent observer un déclin puis une recrudescence de leurs effectifs au cours de la période étudiée.

En s'intéressant au détail des variations, on note que la majorité des espèces étudiées (15 sur 17) observent une rupture dans leur dynamique, avec un changement de tendance qui débute entre 2007 et 2011 pour leur(s) période(s) principale(s) de présence. Le cas du Courlis cendré *N. arquata* est celui qui illustre cette rupture de la manière la plus frappante.

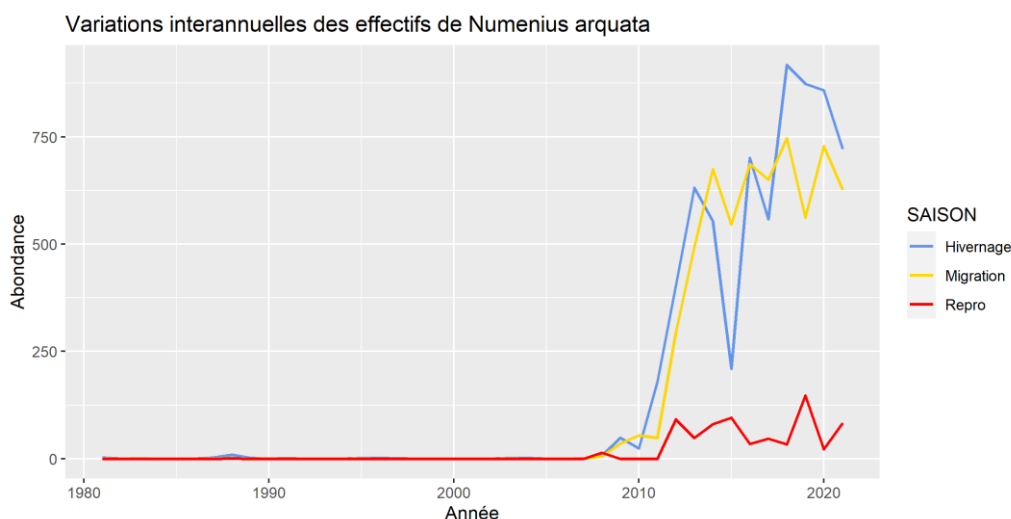
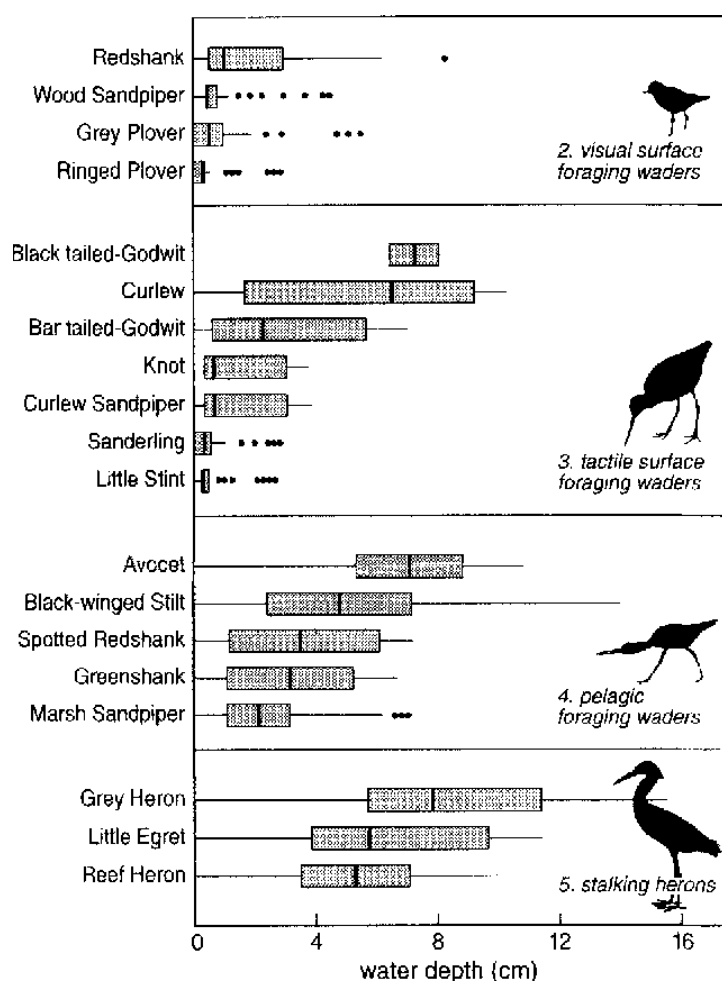


Figure 16 : Variations interannuelles des effectifs de Courlis cendré *N. arquata* entre 1981 et 2021

Ce point d'inflexion marque généralement une augmentation plus marquée des effectifs, voire une inversion de la tendance pour les espèces qui déclinaient. Il coïncide dans sa temporalité

avec un changement radical de gestion du site. En effet, en 2007, Claude Feigné remplace Alain Fleury au poste de conservateur de la ROT et opère des modifications dans la gestion hydraulique du site. Considérant le déclin des anatidés sur la Réserve (en particulier des canards dits « plongeurs », qui ne sont pas étudiés dans ce projet), la gestion hydraulique est orientée de manière à rendre la ROT attractive pour d'autres taxons : les limicoles (Feigné C., comm. pers.). Les niveaux d'eau sont revus à la baisse sur l'intégralité du site afin d'entrer en connivence avec les préférences des limicoles en matière de profondeur des eaux [21, 22](Ntiamoa-Baidu Y., 1998 & Fredrickson L. H., 1991). Comme le présente la figure 17, les limicoles fréquentent généralement des zones en eau dont la profondeur est inférieure à 10 cm. D'après Fredrickson (1991)[22], les Canards souchet et pilet *S. clypeata* et *A. acuta* préfèrent quant à eux les niveaux d'eau compris entre 14 et 24 cm de profondeur. S'il serait aberrant d'extrapoler cette donnée à toutes les espèces d'anatidés, notons toutefois que ces canards font partie des canards dits « de surface » et fréquentent ainsi des eaux de profondeur moindre que les canards plongeurs. Baisser les niveaux d'eau contribue ainsi à favoriser les limicoles au détriment d'une partie des anatidés et constitue la principale piste explicative de l'augmentation de leurs effectifs depuis la fin des années 2000.



Nom anglophone	Nom scientifique	Nom francophone
Redshank	<i>Tringa totanus</i>	<i>Chevalier gambette</i>
Wood Sandpiper	<i>Tringa glareola</i>	Chevalier sylvain
Grey Plover	<i>Pluvialis squatarola</i>	<i>Pluvier argenté</i>
Ringed Plover	<i>Charadrius hiaticula</i>	<i>Grand gravelot</i>
Black-tailed Godwit	<i>Limosa limosa</i>	<i>Barge à queue noire</i>
Curlew	<i>Numenius arquata</i>	<i>Courlis cendré</i>
Bar-tailed godwit	<i>Limosa lapponica</i>	<i>Barge rousse</i>
Knot	<i>Calidris canutus</i>	<i>Bécasseau maubèche</i>
Curlew sandpiper	<i>Calidris ferruginea</i>	Bécasseau cocorli
Sanderling	<i>Calidris alba</i>	Bécasseau sanderling
Little Stint	<i>Calidris minuta</i>	<i>Bécasseau minute</i>
Avocet	<i>Recurvirostra avosetta</i>	<i>Avocette élégante</i>
Black-winged Stilt	<i>Himantopus himantopus</i>	Echasse blanche
Spotted Redshank	<i>Tringa erythropus</i>	<i>Chevalier arlequin</i>
Greenshank	<i>Tringa nebularia</i>	<i>Chevalier aboyeur</i>
Marsh Sandpiper	<i>Tringa stagnatilis</i>	Chevalier stagnatile
Grey Heron	<i>Ardea cinerea</i>	Héron cendré
Little Egret	<i>Egretta garzetta</i>	Aigrette garzette
Reef Heron	<i>Egretta gularis</i>	Aigrette des récifs

Figure 17 : Préférences de 19 espèces communes de limicoles et échassiers quant à la profondeur de l'eau (source : Ntiamoa-Baidu Y. & al., Université de Groningen, 1998).

Tableau 5 : Correspondance entre les noms anglophones, scientifiques et francophones des espèces présentées en figure 17. En gras et italique : Espèces patrimoniales de la Réserve Ornithologique du Teich.

Concernant les Courlis cendrés *N. arquata* et les Barges à queue noire *L. limosa*, il est à noter que ce changement de gestion se voit synchrone avec la signature d'un moratoire interdisant pour 5 ans la chasse de ces deux espèces (A. 30 juill. 2008, relatif à la suspension de la chasse de certaines espèces de gibier, voir la table des lois en Annexe 1). Bien que cet arrêté ait été controversé et que ses multiples prolongations aient été sujettes à débat, la chasse du Courlis cendré et de la Barge à queue noire est toutefois suspendue, presque sans interruption, depuis le 30 juillet 2008. Il semble raisonnable de penser que cette suspension a eu un effet bénéfique sur l'état des populations de ces deux espèces sur la Réserve Ornithologique du Teich, cette dernière étant située sur leur couloir migratoire et constituant un important site d'hivernage.

5.1.2. Variations saisonnières d'abondance des espèces patrimoniales

Afin d'identifier les périodes de présence, les dates des pics de passage migratoire ou encore l'intensité et la durée de ceux-ci, les données de comptage des dix dernières années ont été compilées et modélisées. Les graphiques issus de ces modélisations, d'intérêt descriptif, sont présentés en annexe 6.

Ces graphes permettent d'apprécier la saisonnalité de la fréquentation de la ROT par les espèces patrimoniales. Si pour les anatidés, un pic de passage est observé au cours de la migration prénuptiale immédiatement après les premiers départs des hivernants, la plupart des limicoles en revanche fréquentent davantage le site lors de leur migration postnuptiale.

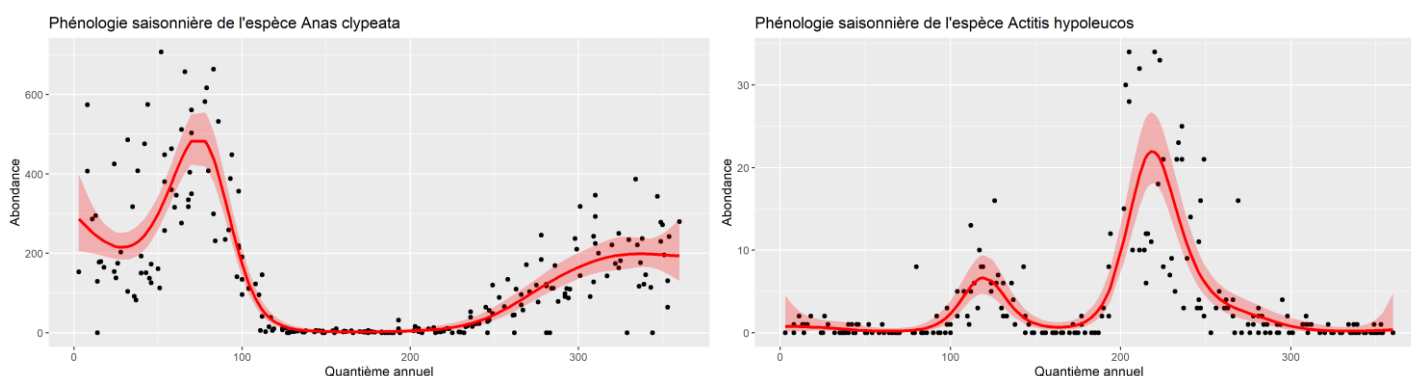


Figure 18 : Phénologie saisonnière de la fréquentation de la ROT par le Canard souchet *A. clypeata* et le Chevalier quignette *A. hypoleucos*.

En effet, 9 des 14 espèces de limicoles du site présentent des effectifs plus conséquents ou des périodes de passage plus étalées lors de leur migration postnuptiale. Parmi les 5 restantes, il est impossible de distinguer nettement les phases migratoires de la période d'hivernage pour trois d'entre elles : l'Avocette élégante, la Barge à queue noire et le Bécasseau variable. Le Bécasseau maubèche et le Chevalier gambette semblent aussi présents en migration prénuptiale et postnuptiale.

Ces disparités proviennent avant tout des « couloirs migratoires » spécifiques à chaque espèce, phénomènes avérés mais encore mal documentés, et la différence de passage entre les migrations prénuptiale et postnuptiale pourrait être liée à l'orientation des vents [23](Migracion, Biolovision, 2003-2022). Les activités cynégétiques en période postnuptiale pourraient également expliquer la présence d'effectifs plus conséquents, les oiseaux se concentrant sur les sites protégés

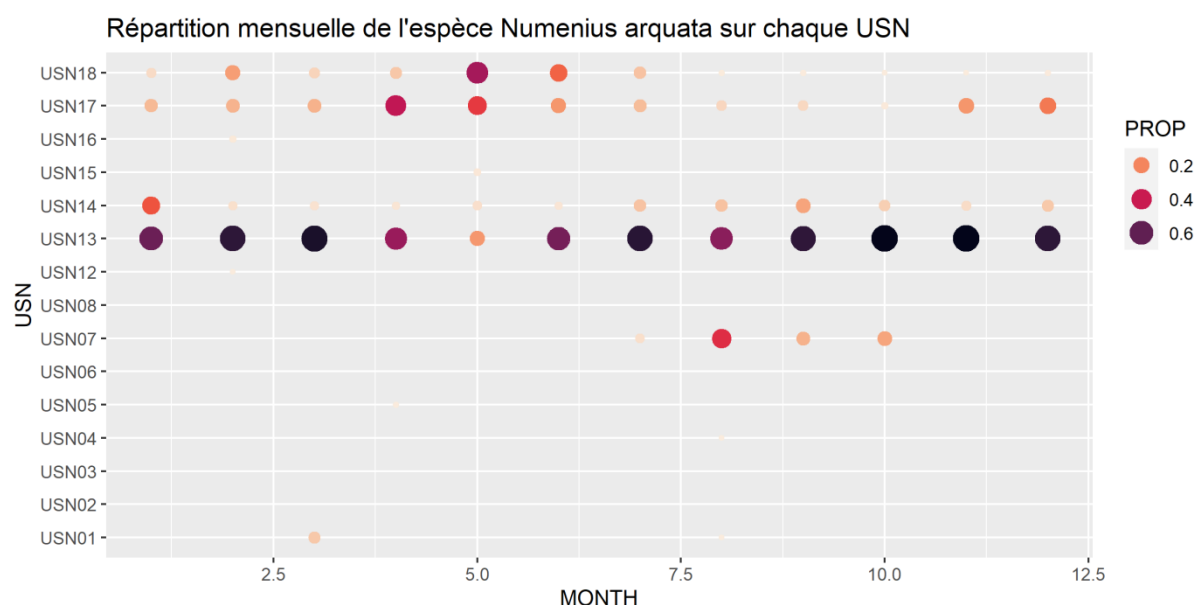
pour assurer leur quiétude. Il ne s'agit cependant que de suppositions qui n'ont pas été explorées davantage.

5.2. Thème 2 : Disparités spatiales et analyses écologiques

5.2.1. Caractérisation de l'occupation des unités de comptage par les communautés d'oiseaux

5.2.1.1. Occupation par chaque espèce patrimoniale

Sur le terrain, il est constaté que certaines espèces sont plutôt spécialistes d'un petit nombre d'unités de comptage tandis que d'autres sont ubiquistes. Il semble aussi, bien que le phénomène soit moins détectable par observation, que la fréquentation des USN change au cours de l'année pour certaines espèces. Ce phénomène est notamment visible pour le Courlis cendré *N. arquata* ou le Chevalier guignette *Actitis hypoleucos*.



*Figure 19 : Répartition mensuelle du Courlis cendré *N. arquata* sur les différentes unités de comptage*

Sur le graphique ci-dessus, nous observons qu'une petite partie des Courlis cendrés occupe l'USN07 « Marais Aigrette » entre août et octobre. Cette proportion atteint jusqu'à 30% de la population totale de l'espèce sur la ROT. Grâce à l'identification de certains individus par lecture de bagues, il semble que ces individus constituent un groupe habitué à fréquenter la ROT, et en particulier cette unité de comptage.

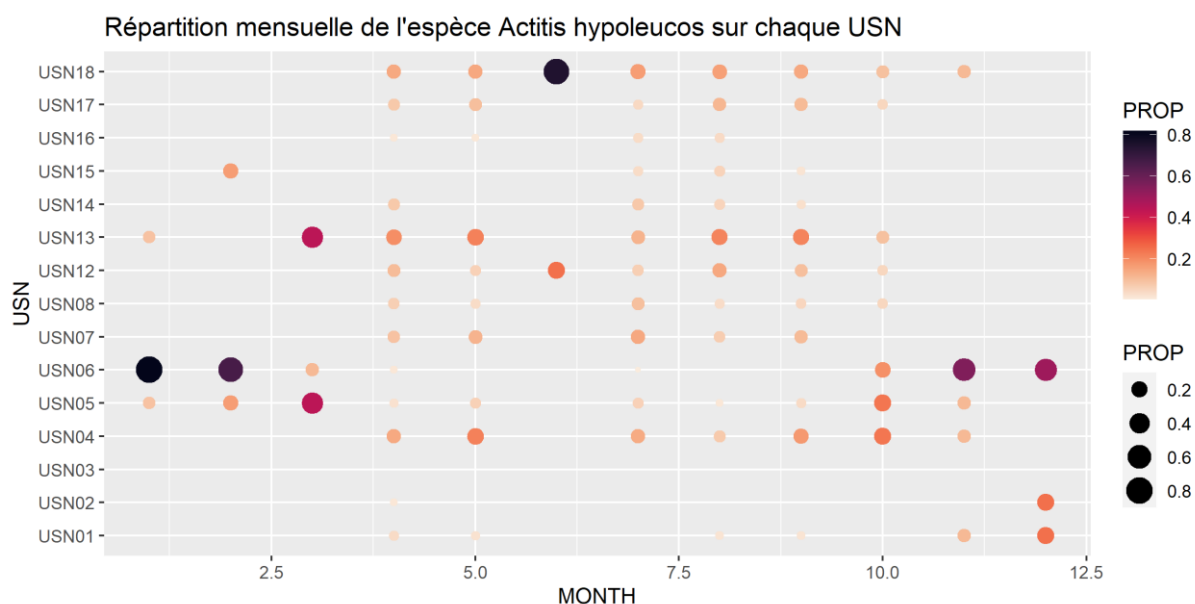


Figure 20 : Répartition mensuelle du Chevalier guignette A. hypoleucos sur les différentes unités de comptage

De la même manière, bien que le Chevalier guignette soit une espèce plus ubiquiste observable sur chaque unité de comptage en proportion variable, il apparaît que les quelques individus hivernants fréquentent principalement l'USN06 « Grand Large Ouest » tandis que les quelques estivants se concentrent sur l'USN18 « Lagune Avocette ». Cette concentration des individus résidant sur la ROT sur une longue période, d'une durée supérieure à celle d'une halte migratoire, sur certaines unités de comptage pourrait être motivée par la disponibilité de la ressource alimentaire.

Ces observations mettent en évidence deux éléments. Tout d'abord, comme présumé, les différentes unités de comptage n'ont pas la même attractivité pour chaque espèce patrimoniale. Deuxièmement, la variabilité temporelle dans l'occupation des différents secteurs révèle des différences comportementales entre les communautés qui circulent sur la ROT, même au sein d'une même espèce.

5.2.1.2. Variations saisonnières de l'occupation par les communautés d'oiseaux

Contrairement à l'approche précédente espèce-centrée, cette approche site-centrée vise à décrire comment les effectifs globaux se répartissent sur la ROT selon la saison.

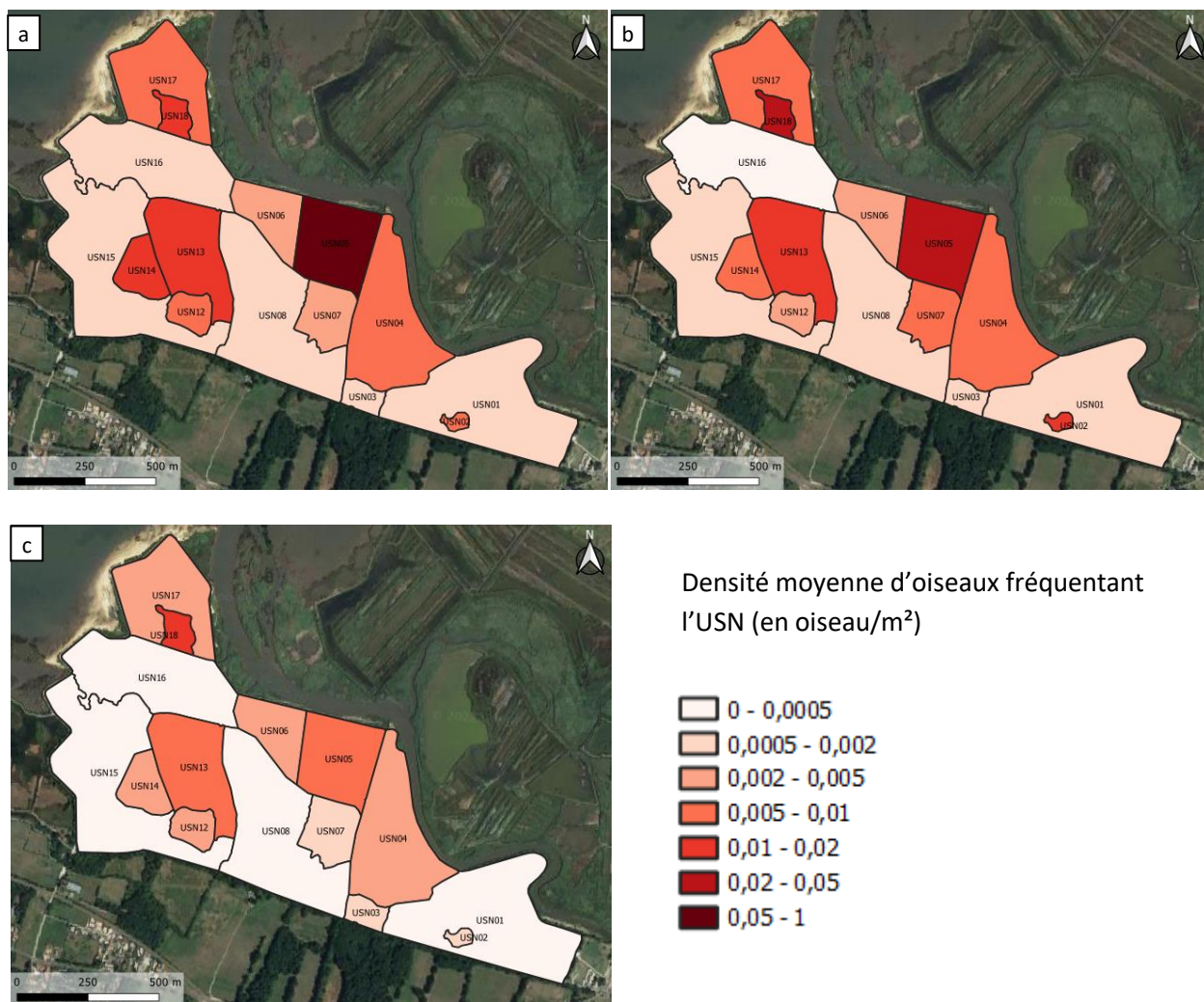


Figure 21 : Répartition des oiseaux sur les différentes unités de comptage.

- En saison d'hivernage
- En saison migratoire
- En saison de nidification

Toutes espèces confondues, c'est l'USN 05 « Grand Large Centre » qui apparaît la plus attractive pour les oiseaux, en particulier en période d'hivernage et en migration. Cela s'explique en réalité par les espèces qui la fréquentent : Bécasseaux variables, Pluviers argentés et Barges à queue noire comptent parmi celles qui constituent les groupes les plus conséquents.

En période de nidification toutefois, l'USN 18 « Lagune Avocette », aménagée pour favoriser la nidification des laro-limicoles, s'avère être la plus attractive et témoigne de l'efficacité des mesures de gestion en faveur de la nidification.

5.2.2. Indices écologiques de diversité

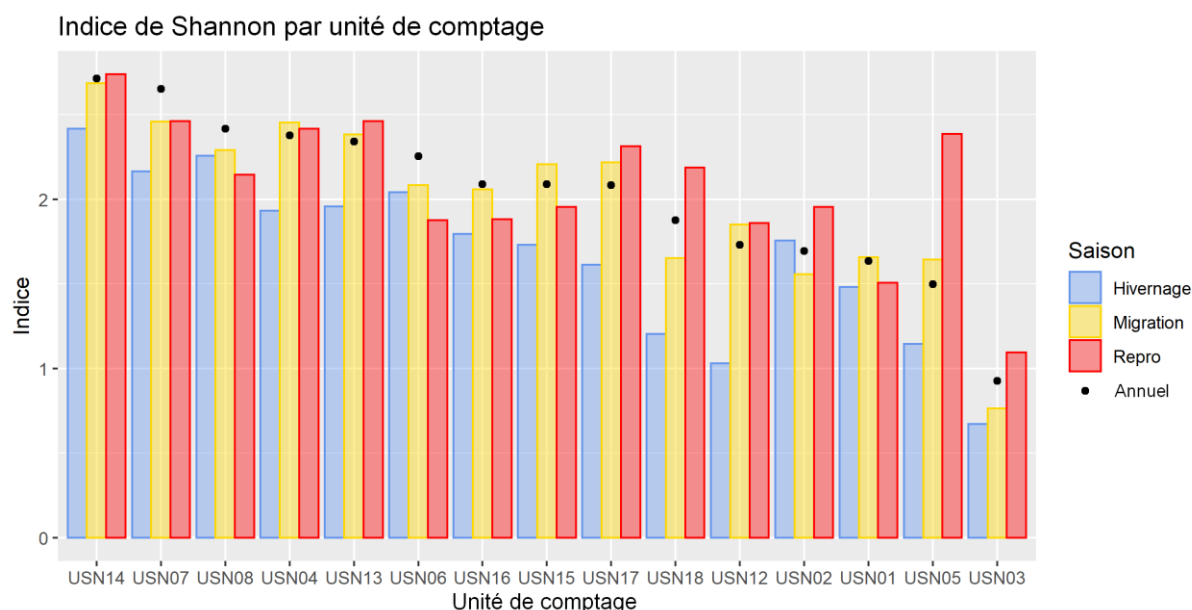


Figure 22 : Indice de Shannon par saison biologique pour chaque unité de comptage.

Les indices de Shannon présentés dans l'histogramme ci-dessus témoignent de différences entre les unités de comptage au regard de la diversité avifaunistique dont elles disposent. En effet, plus l'indice de Shannon est élevé, plus la communauté d'oiseaux est diversifiée et équilibrée. C'est pour cela que des unités de comptage telles que l'USN05 « Grand Large Centre » peuvent présenter des indices écologiques faibles en période d'hivernage : bien que l'unité soit fréquentée, l'avifaune y est dominée par les Bécasseaux variables dont les groupes peuvent atteindre plusieurs milliers d'individus.

Le nuage de points noirs superposé à l'histogramme représente l'indice de Shannon calculé en considérant les comptages sur l'intégralité de l'année. Lorsque ces indices sont supérieurs aux indices saisonniers, cela témoigne d'un important changement dans les communautés entre les différentes saisons. En effet, si les espèces des diverses saisons se recoupent, l'indice de Shannon global ne peut être supérieur aux indices individuels. En revanche, si les communautés changent au fil des saisons, chaque saison apporte un lot d'espèces supplémentaires qui viennent enrichir la diversité spécifique totale et ainsi, augmenter l'indice de Shannon.

Notons que la diversité sur certaines unités de comptage se retrouve artificiellement sous-estimée en raison de la méthode de calcul. En effet, l'USN03 aussi appelée « Marais Cistude » présente un indice de Shannon très faible quelle que soit la saison et cela est dû à une faible richesse spécifique (hors passereaux, 14 espèces contactées sur l'ensemble des comptages). Cela ne signifie pas, cependant et au contraire, que l'unité n'a pas d'intérêt écologique. En effet, rien qu'au sujet de l'avifaune, cette étude ne considère pas les passereaux, et en particulier les passereaux forestiers, qui fréquentent régulièrement les boisements en périphérie du marais. Cette étude ne considère pas non plus tous les autres taxons de la faune, que le secteur héberge également.

Cette étude permet toutefois d'identifier les unités et les saisons à plus forts enjeux quant à la biodiversité avifaunistique littorale.

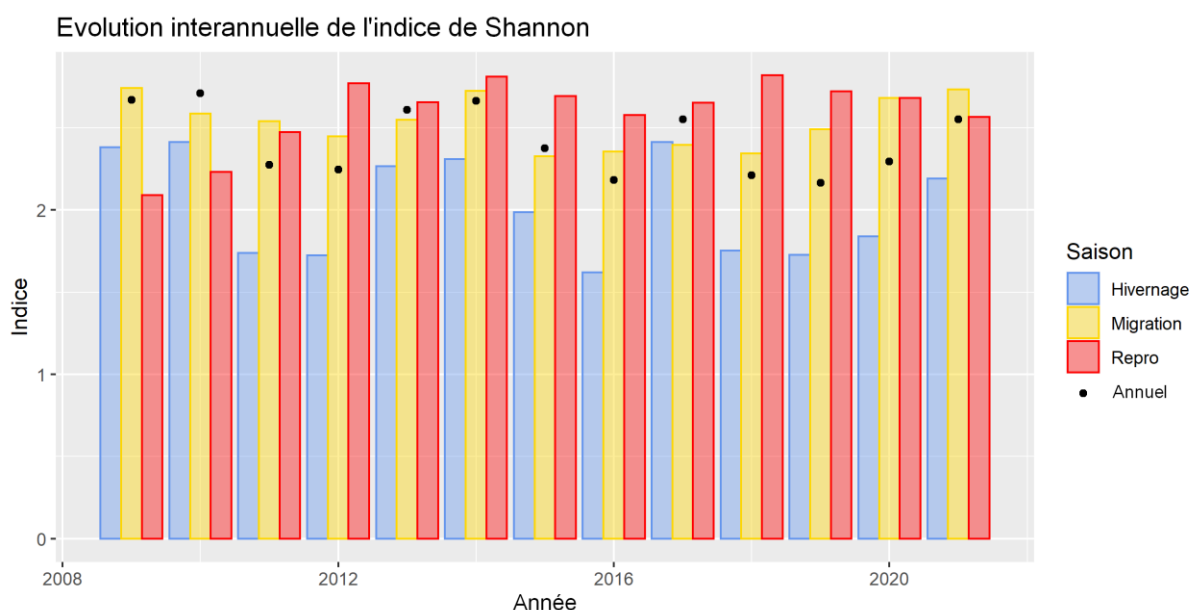


Figure 23 : Evolution annuelle de l'indice de Shannon par saison biologique sur l'ensemble de la ROT.

Lorsque l'on s'intéresse à l'évolution interannuelle des indices de Shannon, aucune tendance particulière ne semble se dégager. Il aurait été intéressant de prolonger la série temporelle avant 2009, afin d'identifier l'éventuel impact du changement de gestion de 2007, mais la nature des données ne le permet pas, puisque la notion d'unité de comptage a été définie par Claude Feigné peu après sa prise de fonctions.

5.2.3. Similarité des unités de comptage au regard des communautés d'oiseaux qui les peuplent

Après avoir étudié la diversité α de chaque unité de comptage, nous nous intéressons à la diversité β et aux similarités que ces unités présentent. En effet, les communautés d'oiseaux qui fréquentent chaque unité de comptage ne sont ni parfaitement identiques, ni parfaitement distinctes, et leur degré de similarité varie selon les USN que l'on compare.

Classification des unités de comptage par similarité des communautés annuelles

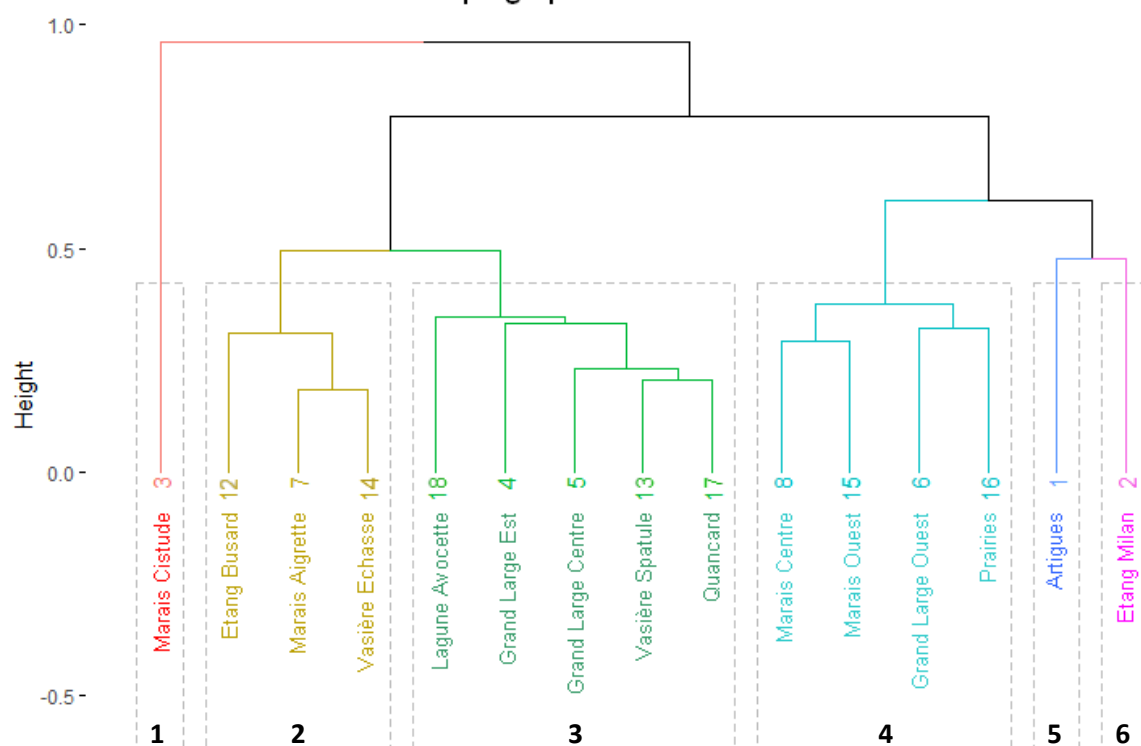


Figure 24 : Classification des unités de comptages par similarité des populations d'oiseaux annuelles

Sur le dendrogramme qui résulte de cette analyse, nous remarquons que les unités de comptage se divisent en six groupes majeurs ainsi répartis sur la ROT.

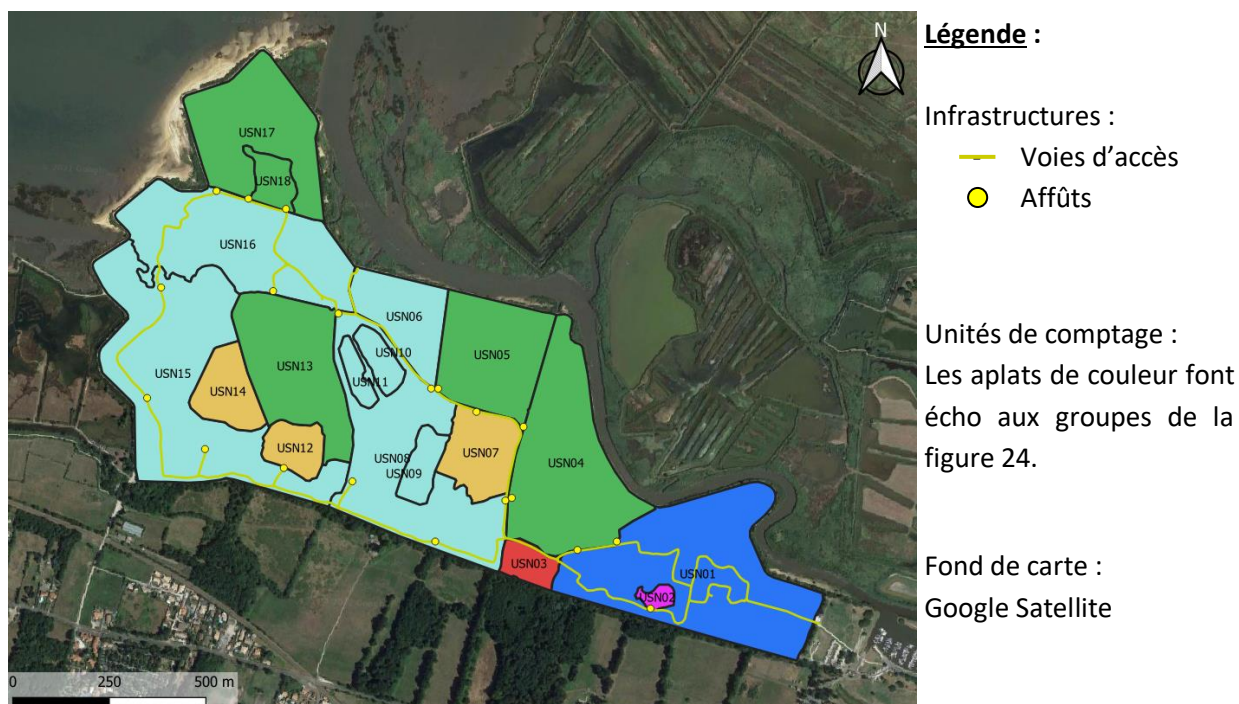


Figure 25 : Cartographie des unités de comptages par similarité des populations d'oiseaux annuelles

Nous avons cherché des pistes explicatives à la fréquentation des différentes USN par différentes communautés d'oiseaux. La piste privilégiée est la profondeur de fond des plans d'eau dans chacune des unités de comptage. En effet, nous avons déjà évoqué la répartition de l'avifaune aquatique en strates dépendant de la profondeur de l'eau. Ici, nous constatons que les USN présentant une profondeur élevée sont rassemblées dans le même groupe (groupe 4 – cyan) et les USN de faible profondeur dans le groupe 3 (vert). Il semble que les unités du groupe 2 (jaune) soient fréquentées par des communautés plus hétérogènes, incluant des proportions plus équilibrées d'anatidés, ardéidés et limicoles principalement.

En marge de ces trois groupes principaux, nous constatons que trois unités ne peuvent être rassemblées avec aucune autre. C'est le cas des USN 01 « Artigues », 02 « Etang Milan » et 03 « Marais Cistude ». Nous avons déjà évoqué le cas du Marais Cistude lorsque nous nous intéressions aux indices de diversité α . Peu fréquentée par l'avifaune aquatique, en particulier patrimoniale, elle est surtout un refuge pour les reptiles, amphibiens et insectes, et présente une communauté d'oiseaux sensiblement différente des autres unités (de part sa faible diversité avifaunistique).

Plus petit secteur de la ROT, l'USN 02 est l'une des seules unités de comptage en eau douce avec l'Etang Busard (USN 09) et le Marais Cistude. A la manière de ce dernier, de sa faible superficie découle une diversité avifaunistique plus restreinte et distincte des autres USN. A titre d'exemple, c'est sur ce secteur que se concentrent la majorité des martins-pêcheurs d'Europe *Alcedo atthis* et bihoreaux gris *Nycticorax nycticorax*, beaucoup moins observés sur le reste de la ROT.

Enfin, l'USN 01 « Artigues » est certainement celle qui propose la plus grande difficulté d'interprétation. Bien qu'elle présente des zones en eau de profondeur variée, favorables à l'accueil de divers taxons, très peu de limicoles y sont observés et l'essentiel de l'avifaune qui la fréquente est constituée de Canards colverts *Anas platyrhynchos* et foulques macroules *Fulica atra*. Cependant, une hypothèse explicative peut-être envisagée : celle du dérangement. Les espèces observées sont des espèces qui apparaissent peu sensibles au dérangement et peuvent facilement être approchées à quelques mètres sans affût. Parallèlement, Artigues est l'unité de comptage qui comporte le plus long linéaire de sentiers avec 1,6 km de chemins d'accès. La particularité de ces chemins est l'absence quasi-totale de pare-vue les longeant, créant un contact visuel direct entre le visiteur et l'oiseau qui pourrait limiter la fréquentation par toutes les espèces farouches et sensibles au dérangement. Notons toutefois qu'il ne s'agit que d'une hypothèse et que l'effet du dérangement n'a été ni vérifié, ni quantifié au cours de ce projet.

5.3. Thème 3 : Rapport aux facteurs bioclimatiques et environnementaux

5.3.1. Analyse de l'influence des variables horaires et environnementales sur l'abondance des espèces patrimoniales

Afin de faciliter la compréhension de cette partie, celle-ci sera subdivisée en autant de paragraphes que de paramètres étudiés. Les boxplots et violin plots présentés sont issus des mêmes données que celles ayant servi à calculer les ANOVA et figurent dans leur intégralité en annexes 7 (influence du coefficient de marée) et 8 (influence de la demi-période circadienne). Pour chaque espèce et chaque paramètre, trois ANOVA ont été calculées et trois graphiques ont été produits, correspondant chacun à une saison biologique.

5.3.1.1. Analyse de l'influence de la marée

En raison de la définition du protocole de comptage, ce paramètre n'a finalement pas pu être analysé. En effet, les comptages sont programmés à marée haute sur l'hypothèse que le nombre d'oiseaux sur la ROT y est maximal. Compte tenu de la biologie de l'avifaune littorale, cette hypothèse est vraisemblable. Cependant, il est impossible de la vérifier statistiquement par manque de données à marée basse.

5.3.1.2. Analyse de l'influence du coefficient de marée

Si les comptages actuels sont programmés afin de concorder avec les coefficients de marée élevés, les données anciennes nous permettent d'évaluer l'influence du coefficient de marée sur leur abondance sur le site. L'ensemble des boxplots relatifs à l'étude de l'influence du coefficient de marée sur l'abondance de chaque espèce patrimoniale est disponible en annexe 7.

Celle-ci est variable selon les espèces et les saisons. En effet, nous constatons une influence significative ($p \leq 0.05$) de l'ampleur du coefficient de marée sur 8 des 17 espèces patrimoniales en saison d'hivernage, contre 10 en migration et seulement 1 (l'Avocette élégante) en saison de nidification. Pour toutes ces espèces, le constat vérifie l'hypothèse préétablie : la Réserve Ornithologique du Teich se montre plus attractive lors des forts coefficients de marée.

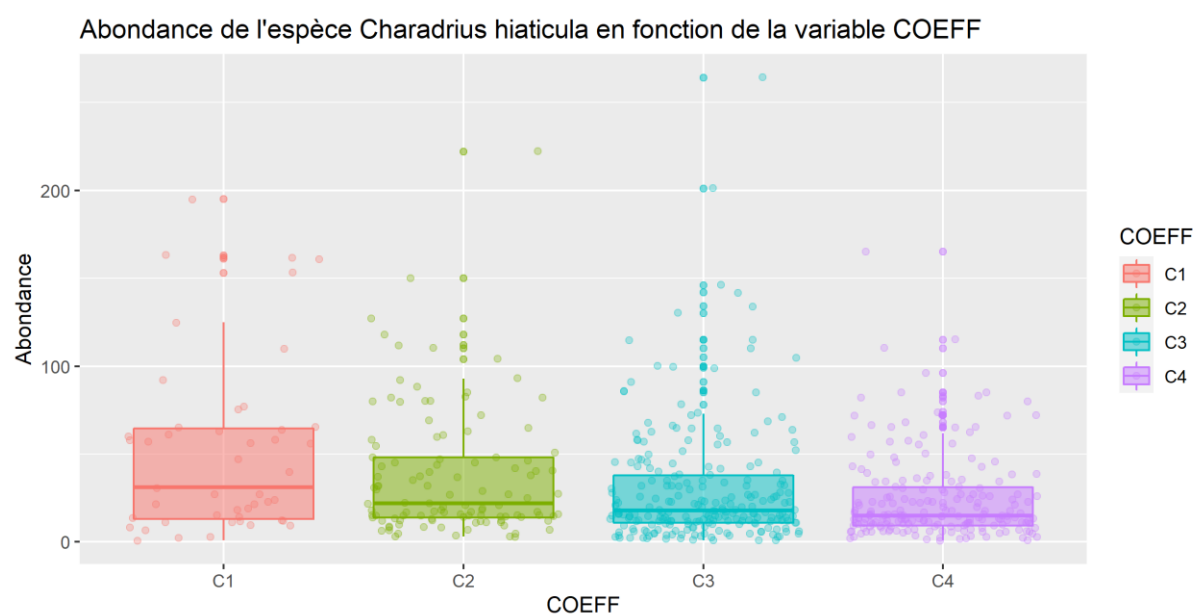


Figure 26 : Boxplots de l'influence du coefficient de marée sur l'abondance de Grands gravelots *C. hiaticula* en saison d'hivernage.

Ces résultats concordent avec les constats de terrain et l'aspect biologique du phénomène étudié. En effet, la plupart des oiseaux des espèces patrimoniales fréquentent la ROT à marée haute afin de l'utiliser comme reposoir. Les jours de grandes marées, lorsque les coefficients sont élevés, l'eau peut inonder certains reposoirs que les oiseaux utilisent lorsque les coefficients sont faibles. Ces individus se concentrent alors sur les reposoirs qui restent émergés, dont la ROT fait partie.

L'une des pistes explicatives au sujet des variations du nombre d'espèces pour lesquelles on observe des différences significatives, n'est pas forcément comportementale. En effet, en moyenne, le groupe « hivernant » rassemble les données de comptages d'une période étendue sur 135 jours, tandis que la période migratoire couvre 174 jours et la période d'estivage, seulement 56. Intrinsèquement, la période de nidification rassemble ainsi moins de comptages et donc moins de données que les deux autres, et les analyses dont elle fait l'objet sont alors soumises à plus d'imprécisions.

A l'inverse, certaines ANOVA se sont révélées significatives malgré le manque de données. C'est le cas du Courlis cendré, en périodes d'hivernage et de migration. Les observations sur le terrain préfigurent de tels résultats, mais le manque de données ne permet pas de certifier leur significativité malgré la $p\text{-value} < 0.05$. En effet, le nombre de données insuffisant ne permet pas d'assurer la vérification des hypothèses de l'ANOVA.

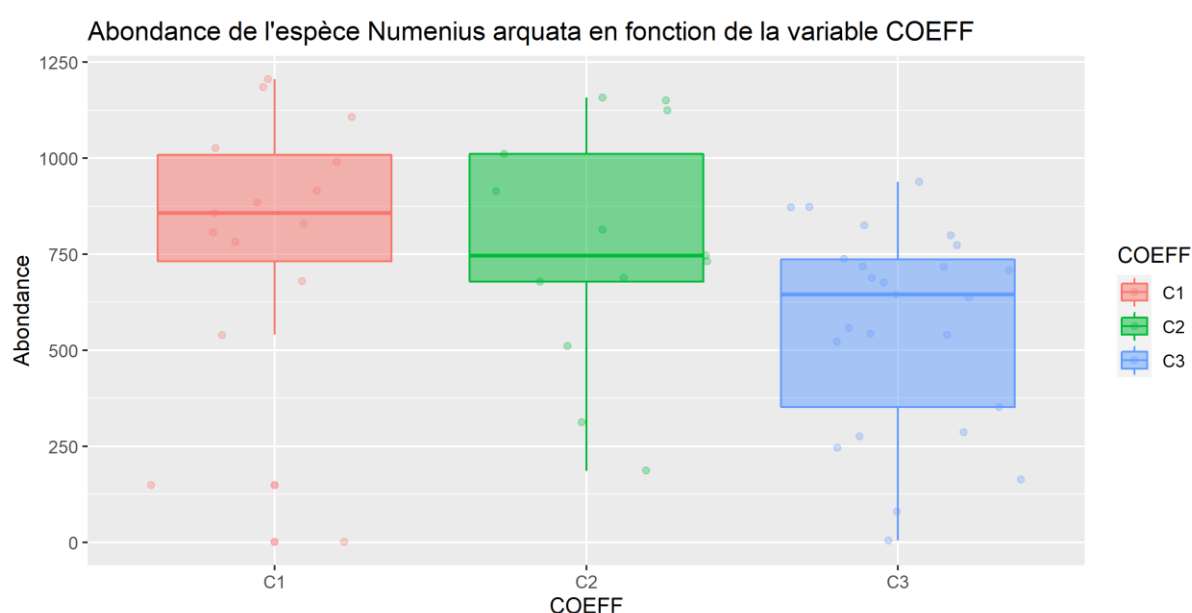


Figure 27 : Boxplots de l'influence du coefficient de marée sur l'abondance de Courlis cendrés N. arquata en saison d'hivernage.

Malgré la vaste série temporelle dont nous disposons pour cette étude, certaines espèces souffrent encore d'un manque de documentation statistique, souvent lié à leur faible durée de présence sur la ROT (le Courlis cendré n'étant présent que depuis 2009).

Le tableau 6 ci-dessous présente un récapitulatif des espèces et saisons pour lesquelles des différences significatives d'abondance sont observées en fonction du coefficient de marée.

Tableau 6 : Tableau récapitulatif de la significativité de l'influence du coefficient de marée

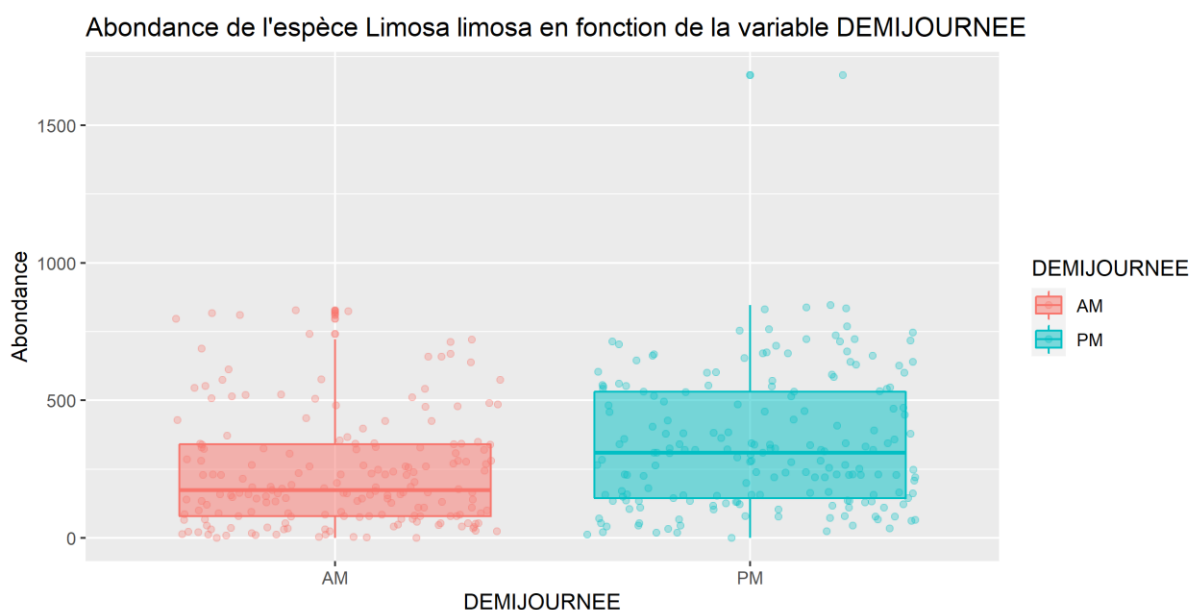
* : $p \leq 0.05$ ** : $p \leq 0.01$ *** : $p \leq 0.001$

SP	Hivernage	Migration	Nidification
Actitis hypoleucos	*	***	
Anas acuta			
Anas clypeata	**	**	
Calidris alpina			
Calidris canutus			
Calidris minuta			
Charadrius hiaticula	***	***	
Limosa lapponica			
Limosa limosa	***	***	
Numenius arquata	*	*	
Numenius phaeopus		***	
Platalea leucorodia			
Pluvialis squatarola		***	
Recurvirostra avosetta	***		***
Tringa erythropus		***	
Tringa nebularia	*	***	
Tringa totanus	***	***	

5.3.1.3. Analyse de l'influence de l'heure du comptage

De la même manière, l'influence de l'heure du comptage sur l'effectif des espèces patrimoniales a été étudiée en séparant les comptages effectués le matin et l'après-midi. A priori et pour la plupart des espèces, l'heure du comptage n'est pas supposée avoir une influence sur ces populations. A la rigueur et au regard des résultats de l'analyse précédente, un biais lié à la répartition des forts coefficients de marée (plus fréquents le matin à des horaires favorables aux comptages) pourrait être envisagé.

Pourtant, l'heure de comptage apparaît significative ($p \leq 0.05$) pour 3 espèces en période d'hivernage, 7 en saison migratoire et 2 en période de nidification. Dans 9 de ces 12 cas, les comptages effectués l'après-midi semblent présenter une abondance plus élevée que ceux du matin.



*Figure 28 : Boxplots de l'influence circadienne sur l'abondance de Barges à queue noire *L. limosa* en saison d'hivernage.*

Les autres graphiques relatifs à l'analyse de l'influence de la demi-période circadienne sont disponibles en annexe 8.

Puisqu'inattendus, ces résultats sont encore mal expliqués et les pistes explicatives proposées ne relèvent que de l'hypothèse. Nous avons déjà évoqué que les oiseaux qui fréquentent la ROT s'en servent essentiellement de reposoir. Or, les oiseaux connaissent généralement leur pic d'activité le matin, période lors de laquelle ils s'alimentent et se dispersent alors, lorsque la marée le permet, sur les estrans du Bassin d'Arcachon.

De manière analogue à la section précédente, le tableau 7 propose un résumé des situations où une différence significative est observable entre les comptages du matin et de l'après-midi.

Tableau 7 : Tableau récapitulatif de la significativité de l'influence de la période circadienne.

* : $p \leq 0.05$ ** : $p \leq 0.01$ *** : $p \leq 0.001$

SP	Hivernage	Migration	Nidification
Actitis hypoleucos		***	
Anas acuta			
Anas clypeata		**	**
Calidris alpina			
Calidris canutus			
Calidris minuta	**	*	
Charadrius hiaticula	***		
Limosa lapponica			
Limosa limosa	***		
Numenius arquata			
Numenius phaeopus		*	
Platalea leucorodia			
Pluvialis squatarola		***	*
Recurvirostra avosetta		**	
Tringa erythropus		***	
Tringa nebularia			
Tringa totanus			

5.3.1.4. Analyse de l'influence des conditions météorologiques

Les analyses des conditions météorologiques n'ont donné aucun résultat significatif. Nous ne pouvons cependant pas en déduire qu'elles n'ont pas d'effet, seulement, pour des raisons techniques d'exécution des comptages, nous manquons de données relatives aux conditions les plus rudes (pluie, fort vent...). De plus, même si de telles données étaient à notre disposition, il conviendrait d'estimer le biais lié à la perte de visibilité et de le distinguer des véritables variations d'effectifs induites par les différences de conditions météorologiques.

5.3.2. Étude de l'impact du dérèglement climatique sur les communautés d'oiseaux nicheurs et hivernants

L'indice thermique des communautés (CTI) permet de comprendre la réponse d'une communauté d'oiseaux aux variations locales des températures. Il est ici représenté sous la forme d'un nuage de points, reliés pour plus de visibilité. Les intervalles de confiance calculés par bootstrap figurent sous la forme d'un ruban bleu.

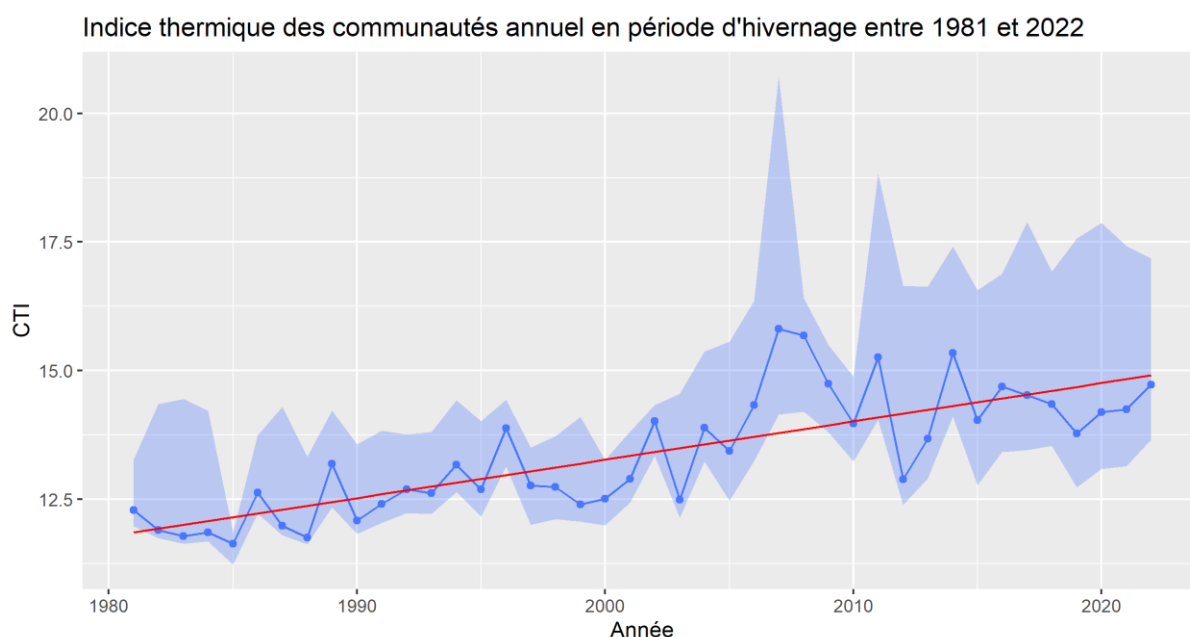


Figure 29 : Evolution de l'indice thermique des communautés hivernantes entre 1981 et 2022

En hivernage, le CTI augmente régulièrement tout au long de la période d'étude, passant d'environ 12,3°C en 1981 à près de 14,8°C en 2022.

D'après les travaux de Godet & al. (2011)[24] sur les limicoles hivernants de la façade atlantique française, cette tendance semble s'observer également à plus large échelle. En effet, entre 1977 et 2009, une augmentation du CTI de 1°C est constatée en considérant 23 espèces de limicoles côtiers du littoral atlantique. Si la ROT ne fait pas donc pas exception, le phénomène semble toutefois de plus grande ampleur.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette différence. Tout d'abord, nous avons utilisé la formule du CTI telle que définie et utilisée par Devictor & al. (2008)[18] et Gaüzère & al. (2020)[19], en considérant l'abondance réelle de chaque espèce tandis que Godet & al. considèrent le logarithme de celle-ci. D'autre part, les espèces étudiées diffèrent pour partie entre les deux études. En effet, pour la période d'hivernage, nous prenons en compte un total de 56 espèces réparties au sein de 14 familles distinctes, pas uniquement des limicoles mais également des laridés, anatidés, rapaces... A l'inverse, certaines espèces présentes dans l'étude de Godet & al. sont absentes de nos travaux : c'est par exemple le cas du tournepierre à collier *Arenaria interpres* ou du combattant varié *Philomachus pugnax*, dont la présence sur la ROT est anecdotique et que nous avons choisi d'écarter afin d'alléger les temps de traitement. Enfin, la taille du site (110 ha) n'est en rien comparable avec la superficie prise en compte à l'échelle des 69 sites étudiés sur la façade atlantique. On peut supposer raisonnablement que sur un site de petite taille, les variations du CTI seront bien plus importantes. En effet, des individus qui remontent de 300 km vers le nord en quête de températures plus adéquates auront quitté le site depuis bien longtemps, tandis qu'ils seront toujours pris en compte dans une étude à large échelle spatiale (qui aura par conséquent une plus grande inertie).

En observant ces résultats, et en particulier l'élargissement des intervalles de confiance vers des indices thermiques élevés depuis 2010, nous nous sommes interrogés sur la contribution de chaque espèce à la variation interannuelle du CTI. En effet, la méthode utilisée pour calculer les

intervalles de confiance implique que ceux-ci seront plus amples si les variations observées ne sont dues qu'à un petit nombre d'espèces. Nous avons donc cherché de quelle manière, et avec quelle intensité, chaque espèce contribuait à la tendance observée.

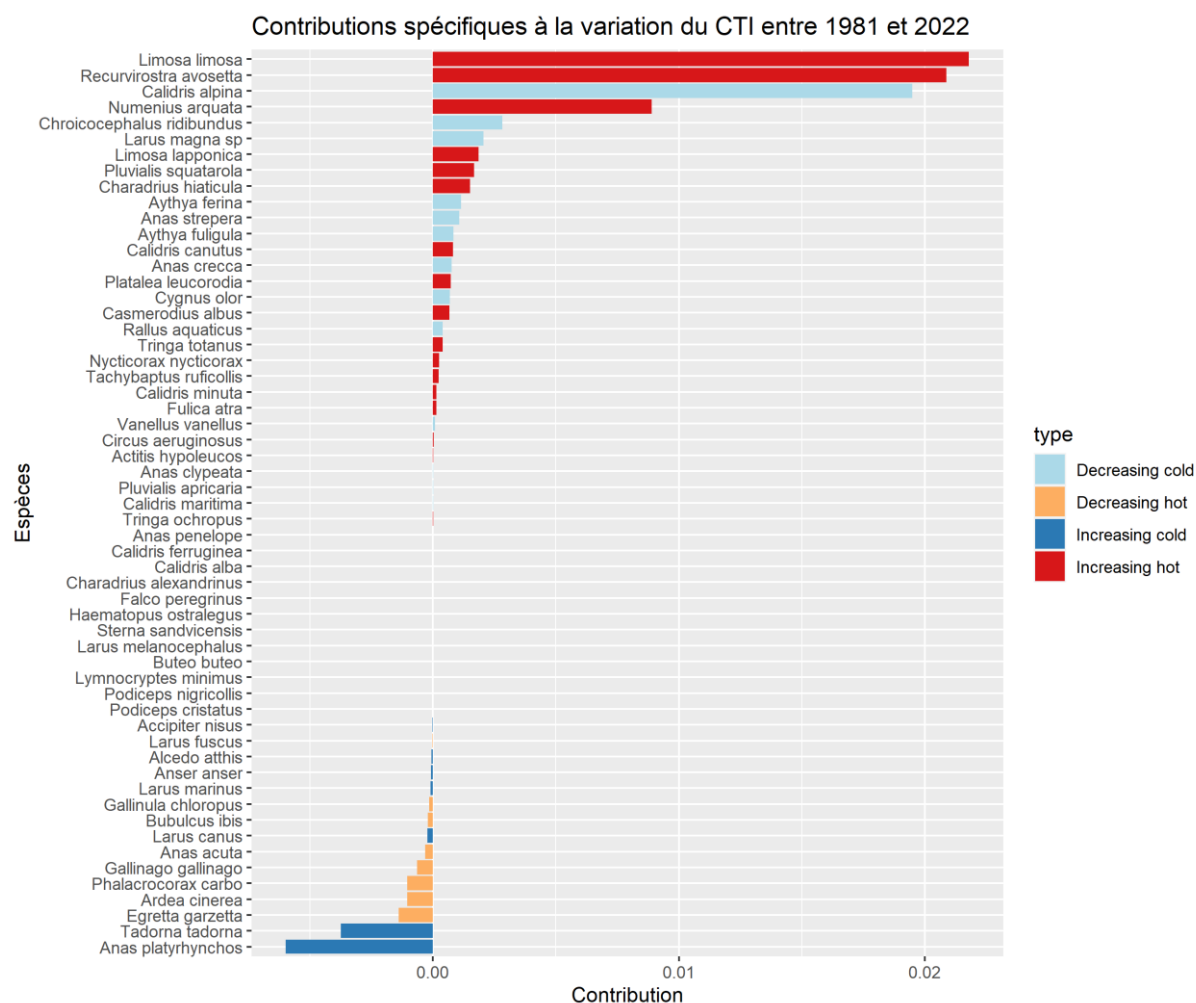


Figure 30 : Contributions spécifiques à la variation interannuelle du CTI hivernal entre 1981 et 2022.

Les espèces présentées à droite du 0 (contribution positive) sont celles qui contribuent à l'augmentation du CTI. Au contraire, celles qui exercent une contribution négative présentent des variations qui tendent à freiner cette augmentation. Les espèces dites « de milieux chauds » sont celles dont le STI est supérieur à l'indice thermique de la communauté. De la même manière, les espèces « de milieux froids » sont celles dont le STI est inférieur au CTI. La contribution est exprimée en degré/an. Par exemple, les seules variations de la proportion de Barges à queue noire dans l'effectif total contribuent à elles seules à augmenter le CTI de 0,02°C par an. Notons cependant que le CTI n'exploite pas des effectifs absolus, mais la proportion de l'espèce dans le nombre d'individus total. Ainsi, une espèce peut être considérée comme « décroissante » au regard de l'analyse CTI sans forcément que ses effectifs soient en diminution.

Nous pouvons noter, comme cela a été observé dans la partie 4.1.1 consacrée aux tendances interannuelles, que les variations du CTI sont principalement mues par une augmentation de la proportion des limicoles (souvent des espèces de milieux chauds) et une diminution de la proportion de la plupart des anatidés (souvent des espèces de milieux froids).

Afin de préciser l'analyse, nous avons scindé la série temporelle en deux parties, antérieure et postérieure à 2007. En effet, bien que le modèle linéaire soit satisfaisant ($R^2 = 0.83$), nous remarquons que la courbe tend à se stabiliser après 2007. Connaissant l'influence du changement de gestion hydraulique sur les effectifs de chacune des 17 espèces patrimoniales, il est apparu intéressant d'étudier plus précisément son impact sur l'évolution du CTI. Les figures résultant de cette décomposition sont présentées en annexe 9.

En décomposant ainsi la série temporelle, on note que l'augmentation de la proportion de Bécasseaux variables est la principale responsable de la stabilisation du CTI après 2007. En tant que principale espèce contribuant à diminuer le CTI, elle explique l'amplitude de l'intervalle de confiance : lorsque le bootstrap l'exclut du jeu de données, l'indice thermique de la communauté n'est plus tiré vers le bas et augmente.

En période d'hivernage, le CTI observe donc une augmentation à l'image de l'ensemble de la façade atlantique, bien que les divergences de méthodes et de sites ne permettent pas d'en quantifier l'adéquation. Pour compléter l'interprétation, il serait intéressant de comparer ces résultats aux variations effectives de température sur la Réserve Ornithologique du Teich. Malheureusement, l'accès à ces données n'a pas pu être obtenu dans le temps imparti au projet. Il est toutefois raisonnable de supposer que les températures moyennes ont connu une hausse au cours des dernières décennies, à l'image de l'ensemble de la région Aquitaine dont les températures moyennes ont augmenté de 1°C depuis 1900 [25](ORRNA¹, 2021).

En période de nidification, le constat est plus inattendu. Bien que les températures soient toujours censément en augmentation, on observe un CTI apparemment découpé en deux phases antérieure et postérieure à 1990.

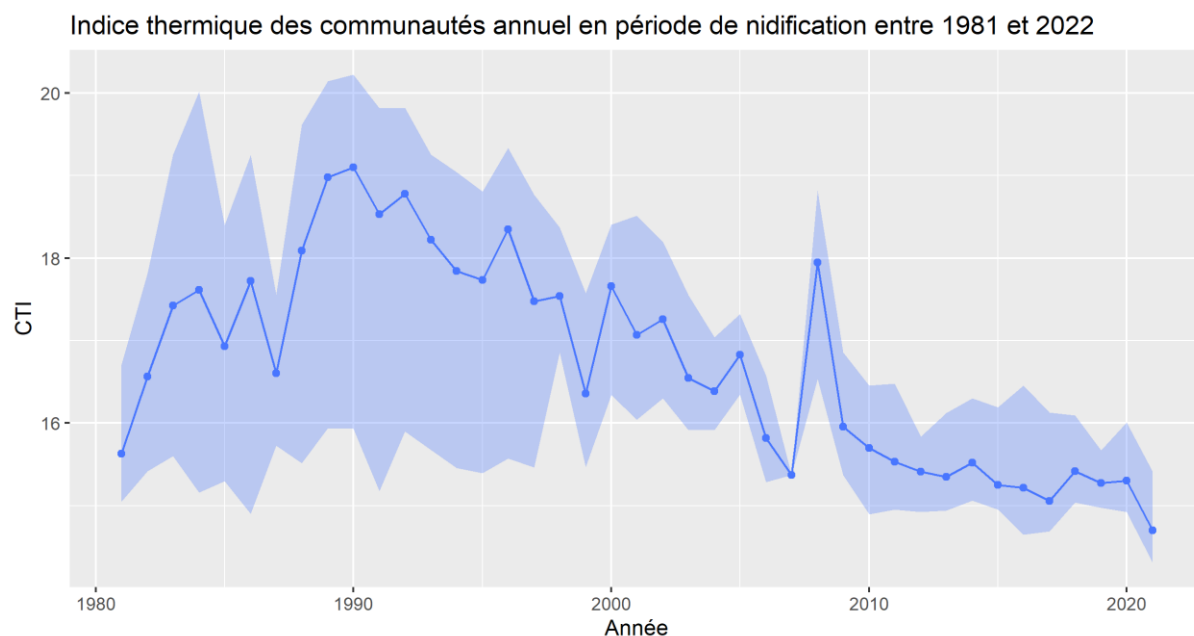


Figure 31 : Evolution de l'indice thermique des communautés estivantes entre 1981 et 2021

¹ Observatoire des Risques de la Région Nouvelle-Aquitaine

Si l'on s'intéresse aux variations du CTI dans leur ensemble, on constate qu'il a diminué en l'espace de 40 ans, passant de 15,7°C en 1981 à 14,7°C en 2021. On observe tout d'abord une étape d'augmentation très rapide du CTI : +3,4°C en 9 ans. Puis celui-ci décroît jusqu'à passer sous la barre des 15°C en 2021. On s'attendrait pourtant, de la même manière que pour les communautés hivernantes, à observer une augmentation lente et régulière du CTI sur toute la période d'étude pour les oiseaux estivants. Afin d'expliquer ce phénomène, les contributions spécifiques ont à nouveau été calculées. Les contributions globales sont présentées en figure 32 ci-dessous, et le détail par période antérieure et postérieure à 1990 est disponible en annexe 10.

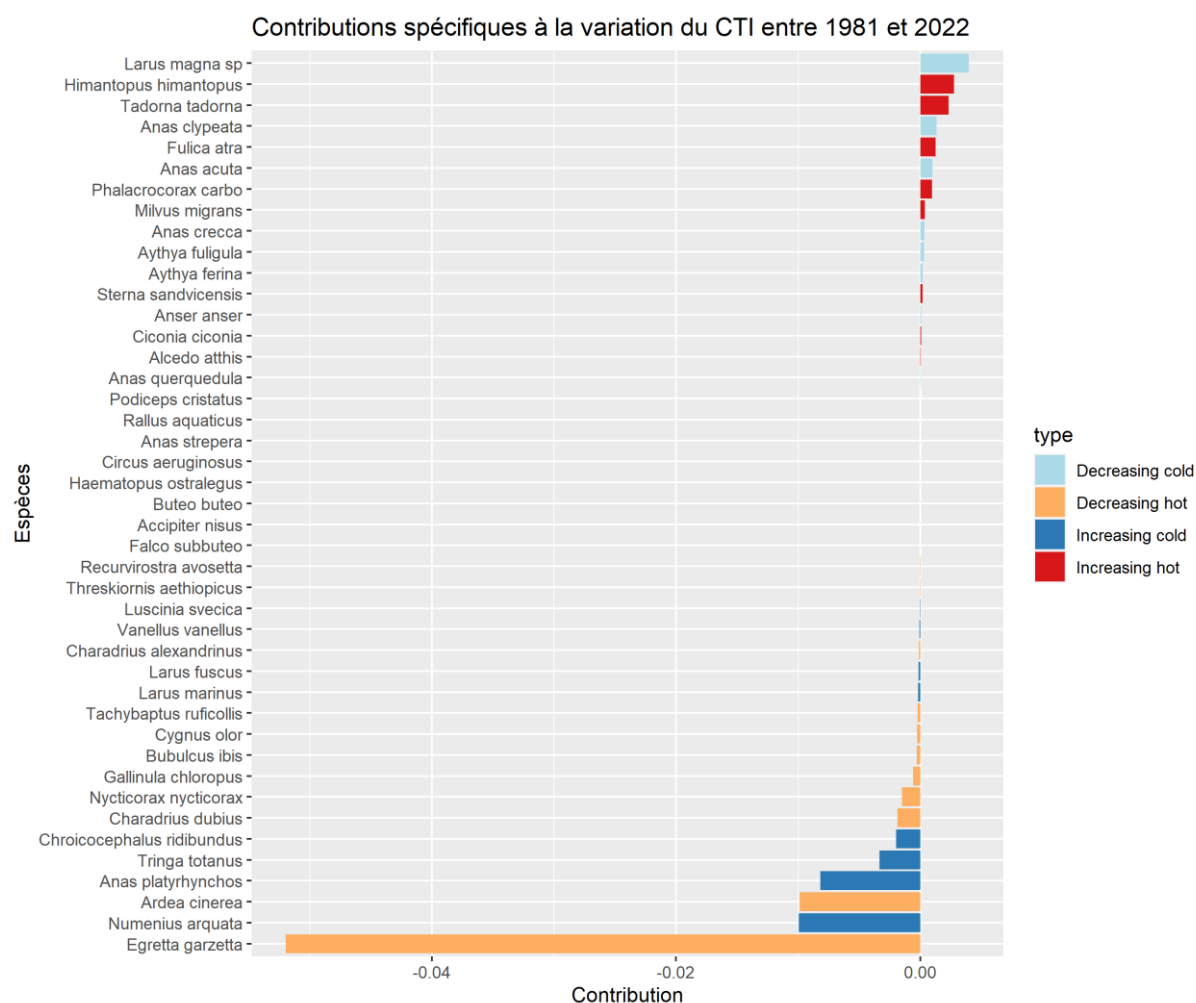


Figure 32 : Contributions spécifiques à la variation interannuelle du CTI estival entre 1981 et 2022.

Le constat est sans appel quant à l'explication de ces variations inattendues : elles sont essentiellement dues à la diminution de la proportion d'Aigrettes garzettes *Egretta garzetta* dans l'effectif total. En effet, dans les années 1980 et 1990, la ROT héberge une colonie nicheuse mixte d'ardéidés, principalement des Aigrettes garzettes mais également des Hérons cendrés *Ardea cinerea*, qui compte jusqu'à 1200 couples nicheurs à son apogée. La colonie est si dense que la végétation qu'elle utilise dépérit, et les nicheurs quittent peu à peu le site jusqu'à le désertifier complètement depuis 2004. L'Aigrette garzette ayant un STI supérieur au CTI, elle est considérée comme une espèce de milieux chauds et son déclin contribue alors à diminuer l'indice thermique de la communauté.

La variation colossale des effectifs de cette espèce explique également l'intervalle de confiance étendu vers le bas, de manière analogue aux variations de proportion du Bécasseau variable en saison d'hivernage. Outre cet ardéidé, la hausse des effectifs estivants de Courlis cendrés et des effectifs nicheurs de Canards colverts *Anas platyrhynchos*, ainsi que le départ de la colonie nicheuse de hérons cendrés sont les principales forces responsables de la diminution du CTI.

Il reste toutefois un élément inattendu : malgré la disparition de la colonie d'ardéidés nicheurs en 2004, l'indice thermique de la communauté estivante continue de décroître. Une analyse détaillée de cette portion de la série temporelle révèle que cette décroissance est principalement liée à la hausse en proportions de trois espèces : le Courlis cendré, le Canard colvert et la Mouette rieuse *Chroicocephalus ridibundus*. Des aménagements spécifiques ont en effet été réalisés afin de favoriser la nidification de cette dernière. Si seulement trois couples nicheurs ont été observés en 2013, les aménagements ont permis de faire croître la colonie de manière exponentielle : en 2022, ce sont 112 couples qui ont été recensés. De plus, la diminution en proportion d'autres espèces, défavorisées par le changement de gestion hydraulique ou par d'autres facteurs extérieurs (fermeture de la décharge à ciel ouvert d'Audenge en 2009, source alimentaire pour plusieurs espèces opportunistes telles que les cigognes blanches *Ciconia ciconia* ou les Milans noirs *Milvus migrans*) achèvent d'expliquer ces tendances inattendues.

En résumé, s'il paraît juste d'affirmer que les dynamiques des populations d'oiseaux en période d'hivernage sont régies par la hausse des températures induite par le dérèglement climatique, il est impossible d'être formel à ce sujet en période de nidification. En effet, celle-ci semble être beaucoup plus influencée par la gestion hydraulique et l'aménagement de sites favorables à la reproduction (nids artificiels, structure des îlots...), ainsi que la disponibilité de la ressource alimentaire. De plus, l'irrégularité de la présence d'individus estivants mais non nicheurs ne permet pas de tirer des conclusions sur l'effet sur la population nicheuse réelle.

6. DISCUSSION

6.1. Critique des analyses effectuées

6.1.1. Sélection des données exploitées dans les ANOVA

Certaines espèces parmi les 17 espèces patrimoniales ne fréquentent pas la ROT depuis le début de la série temporelle. Pour cette raison, de nombreux comptages, en particulier des comptages historiques, ne recensent aucun individu des espèces concernées et écrasent toute variation observable selon les paramètres tidaux et horaires. Par exemple, la figure 33 présente la distribution des abondances de Courlis cendrés lorsque l'on considère tous les comptages depuis 1981.

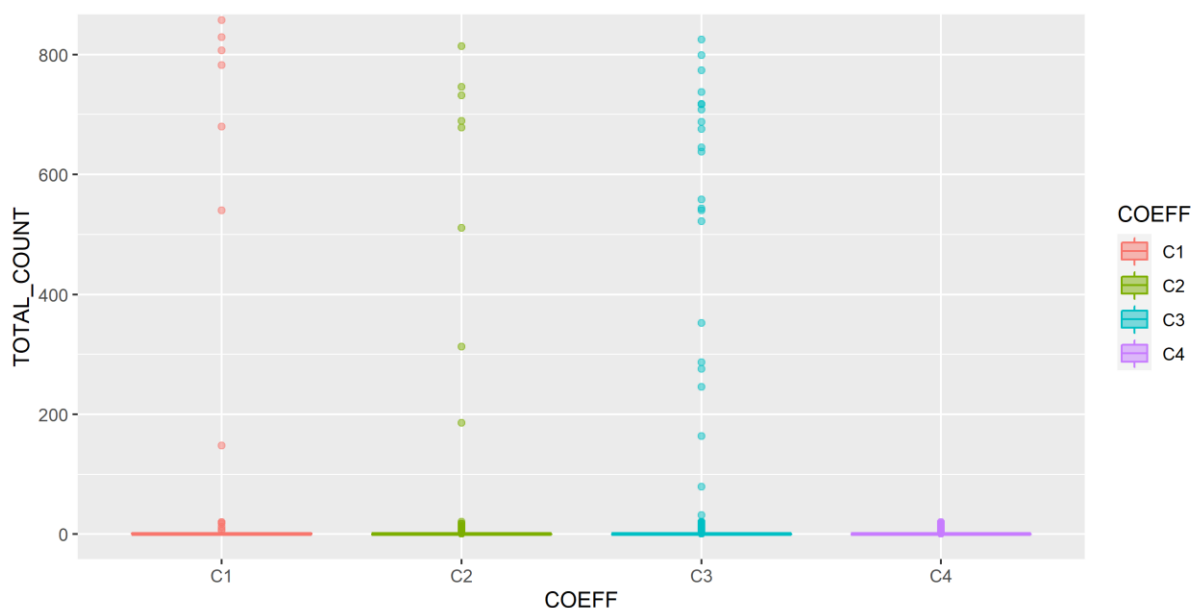


Figure 33 : Abondance des Courlis cendrés N. arquata en fonction des coefficients de marée.

En effet, puisque les Courlis cendrés ne fréquentent pas la ROT avant 2009, les variations liées au paramètre étudiées sont absorbées par leur dynamique interannuelle. Pour remédier à ce problème, il a été choisi d'ignorer tous les comptages des années où l'abondance de Courlis cendrés était inférieure à 20% de l'abondance moyenne des années où l'espèce a été contactée. Ce seuil de 20% a été défini arbitrairement et n'est peut-être pas le plus adapté. Il a été défini de manière à assurer la normalité des résidus en écartant toutes les années où l'abondance était trop faible pour observer d'éventuelles variations liées au paramètre étudié. Toutefois, d'autres alternatives pourraient être envisagées. Dans le cadre de ce travail, d'autres pistes ont été explorées : la définition d'un seuil non sur l'effectif mais sur la date, la conservation de l'ensemble des données et la suppression simple des absences, associée à un « taux de présence » qui serait allé de pair avec les ANOVA présentées. Ces alternatives présentaient des résultats moins satisfaisants et ont été écartées.

6.1.2. Représentation graphique de la répartition des espèces sur les USN

La question de la représentation graphique de la répartition mensuelle des espèces sur les différents secteurs de la ROT a posé quelques difficultés. Il est certain que la représentation à l'aide de *dotplots* n'est pas la plus adaptée. Seulement, cette méthode aura été la plus satisfaisante parmi celles qui ont été envisagées. Des cartographies, plus visuelles mais nécessitant plus d'espace pour représenter des évolutions temporelles, auraient alourdi la lecture du rapport. Sans ordination des USN, un graphique de type « carte de chaleur » aurait rendu la lecture plus ardue.

6.2. Estimation des biais et pistes de corrections

6.2.1. CTI et période de transition

En observant en détail les courbes d'évolution du CTI, nous remarquons que les valeurs des années 2007 et 2008 détonnent en comparaison du modèle linéaire qui s'applique à l'ensemble de la série temporelle. Ces valeurs peuvent paraître aberrantes, mais leur cas n'a pas été clairement défini.

En effet, ces années sont des années de transition entre l'ancien protocole de comptage quotidien et le nouveau, d'abord mensuel puis tri-mensuel. Le nouveau protocole est alors encore mal défini et les données lacunaires. Si la méthode de reconstruction des protocoles a posteriori apparaît fonctionnelle pour les données antérieures à 2006, elle peut être inadaptée aux données de ces années de transition.

Il pourrait être envisagé de s'intéresser plus en détail à ces années de transition afin de trouver une solution plus adaptée à leur gestion.

6.2.2. Protocole de comptage

Certains biais sont induits directement par le protocole de comptage. En effet, ceux-ci sont programmés de manière à maximiser les effectifs d'oiseaux sur la Réserve et sont donc tous effectués à marée haute. Au-delà du fait que l'analyse de l'effet du cycle tidal est donc impossible, cet élément imposé par le protocole implique que seules sont étudiées les populations qui fréquentent la ROT à marée haute. Si des différences sont liées au cycle tidal, elles passeront inaperçues au cours des analyses effectuées dans le cadre de ce projet.

De plus, les comptages trimensuels présentent l'inconvénient, comparé aux comptages quotidiens, de laisser passer des pics migratoires. Ils délivrent intrinsèquement des informations plus lacunaires que des comptages quotidiens – mais la charge de travail associée n'est évidemment pas comparable.

7. PERSPECTIVES

7.1. Perspectives d'amélioration et de consolidation de l'état initial

Afin de consolider les analyses effectuées, principalement relatives à l'occupation des USN par les différentes espèces et l'influence du changement climatique, l'acquisition de données supplémentaires pourrait apporter une plus-value au travail effectué. En effet, une procédure d'obtention des données météorologiques historiques (températures moyennes mensuelles depuis 1981) a été engagée. Cependant le statut administratif hybride de la ROT, à l'intersection entre la Mairie du Teich et le PNRLG, a engendré des contretemps qui n'ont pas permis d'obtenir les données à temps pour leur utilisation dans le cadre de ce rapport. De la même manière, un processus d'acquisition de données topographiques a été enclenché afin d'avoir accès à la profondeur des plans d'eau et de pouvoir la mettre en relation avec la répartition des oiseaux sur la ROT. En raison de contraintes techniques liées au dérangement, et à la coordination avec un organisme extérieur (le SIBA), ces données n'ont pu être obtenues dans le temps imparti.

Il serait toutefois intéressant de procéder à leur acquisition afin de les confronter aux phénomènes ornithologiques observés.

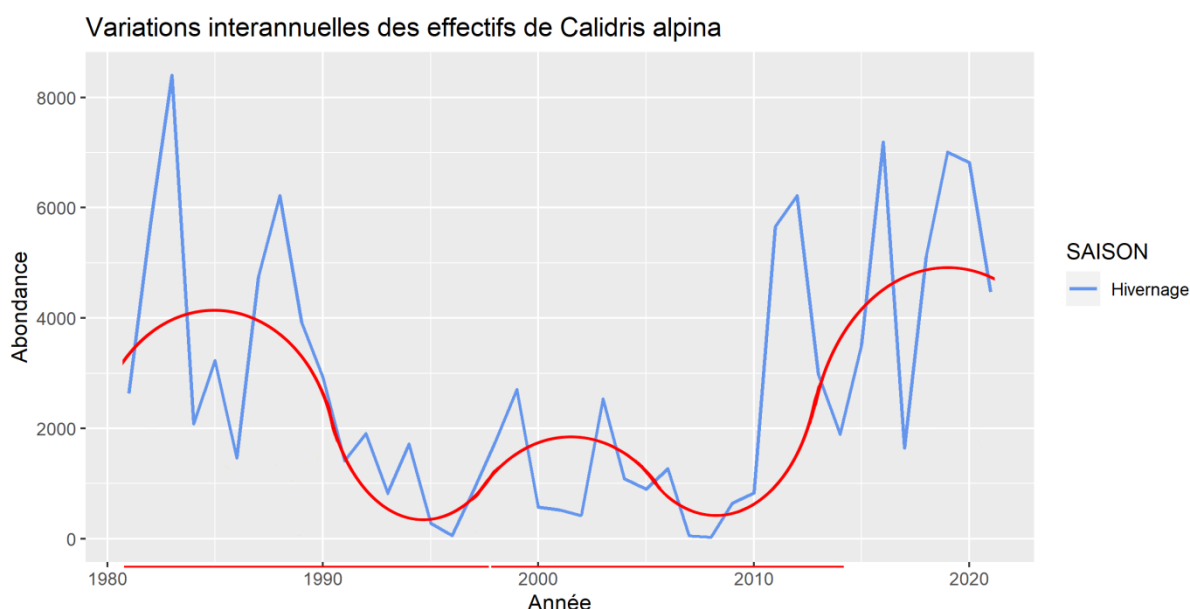
7.2. Perspectives de complétion et pistes à explorer

Au cours de ce travail, qui a constitué un premier pas dans le processus d'analyse des données de la Réserve Ornithologique du Teich, plusieurs pistes d'amélioration et d'analyses à explorer ont été découvertes. En effet, le temps imparti a nécessité de faire des choix et certains

phénomènes qui ont été constatés n'ont pu être davantage explorés, et sont ainsi restés à l'état d'intuition.

7.2.1. Variations cycliques des populations d'oiseaux

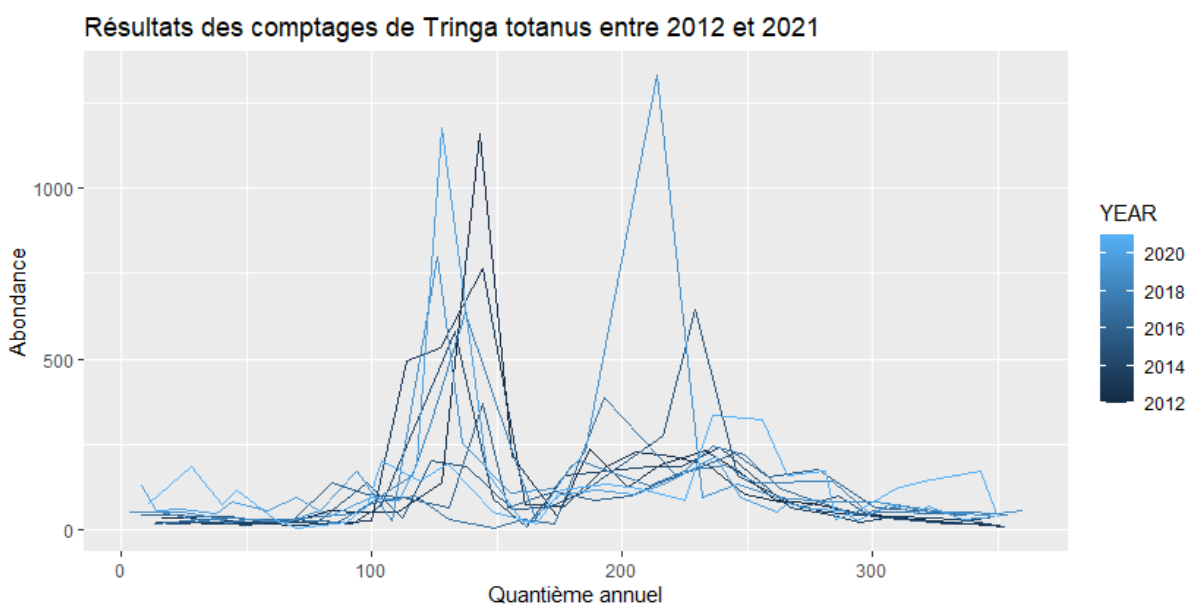
Tout d'abord, il apparaît intéressant d'étudier l'aspect cyclique des dynamiques interannuelles de certaines espèces d'oiseaux. Il a été constaté lors de l'analyse des variations interannuelles de Bécasseaux variables, que l'espèce semblait présenter des variations cycliques de deux fréquences : de 15 à 17 ans pour la plus longue, et de 4 à 6 ans pour la plus courte. Il pourrait être intéressant de déterminer s'il ne s'agit que d'une fausse impression ou d'un phénomène réel, et dans ce cas, chercher à identifier ses causes (phénomènes climatiques ayant un impact sur la reproduction par exemple). La figure 34 présente ces variations cycliques présumées. Les abondances réelles y figurent en bleu, tandis que la courbe rouge, tracée à la main, représente les variations cycliques intuitées.



*Figure 34 : Superposition des variations cycliques intuitées sur la courbe de dynamique interannuelle du Bécasseau variable *C. alpina* en période d'hivernage.*

7.2.2. Décalage de la phénologie migratoire

Lors du calcul des variations saisonnières à l'aide des données des 10 dernières années, il a été constaté que les dates de pic migratoire du Chevalier gambette *T. totanus* apparaissaient de plus en plus précoces. Il serait intéressant d'étudier plus en détail le phénomène afin de s'assurer de son exactitude et d'identifier si d'autres espèces font état de ce type de changements au cours du temps. A présent que la série temporelle a été standardisée sur quarante ans, les données de la ROT pourraient constituer un bon support d'étude de phénologie migratoire.



*Figure 35 : Décalage de la phénologie migratoire du Chevalier gambette *T. totanus* entre 2012 et 2021.*

7.2.3. Mise en relation avec les suivis de population des passereaux

Il pourrait être intéressant de mettre en relation les suivis des oiseaux d'eau par comptage avec les suivis de population des passereaux effectués sur le site depuis peu. Pour l'instant, la série temporelle relative au suivi des passereaux est trop courte pour permettre une analyse de l'évolution et de dégager des tendances. Toutefois, cela pourrait faire l'objet d'un projet d'études futur via l'analyse des données des programmes de baguage (STOC-Capture, PHENO) et de suivi par point d'écoute (STOC-Sites).

7.2.4. Confrontation à d'autres sites

Enfin, contacter d'autres sites similaires, tels que le Domaine de Certes à Audenge (Gironde) ou le Parc Ornithologique du Marquenterre à Saint-Quentin-en-Tourmont (Somme) permettrait, s'ils ont réalisé des études similaires, de confronter les observations effectuées dans le cadre de ce projet à celles d'autres sites.

7.3. Perspectives de structuration des données dès la saisie

Lors de la phase de préparation des données, un temps et des efforts particuliers ont été consacrés à l'homogénéisation des informations contenues dans le champ « Commentaires ». Les multiples dénominations des conditions météorologiques ou la classification non-systématique des informations tidales ont nécessité une réflexion et une gestion préalable à toute analyse afin d'être uniformisées et de minimiser la perte d'informations. Afin d'éviter ce type d'écueils par la suite, l'écriture d'un guide de saisie des données de comptage a été amorcée et discutée avec les techniciens et conservateur de la Réserve Ornithologique du Teich. Le protocole de comptage sera certainement revu et davantage standardisé avant qu'une version définitive de ce guide soit adoptée. Un prototype est toutefois disponible en annexe 11.

7.4. Perspectives d'adaptation des pratiques de gestion

En l'état, il est impossible de proposer des perspectives pertinentes d'adaptation des pratiques de gestion. En effet, les facteurs environnementaux qui influent sur les populations d'oiseaux ont été identifiés, mais l'influence des pratiques de gestion n'a pu être que supposée, et non quantifiée. La confrontation des résultats aux données climatiques et topographiques pourrait apporter des arguments décisionnels afin d'adapter la gestion pour accroître l'accueil des limicoles sur la ROT.

Pour l'instant, deux pistes principales peuvent être envisagées. L'entreprise de travaux de réhabilitation des plans d'eau pourrait être engagée, afin de gérer leur profondeur pour les rendre plus attractifs pour les limicoles. Cependant, alors que la population de la plupart des limicoles est encore croissante ou stable sur la ROT, cela reviendrait à risquer de diminuer son attractivité. Mieux vaudrait accumuler davantage d'éléments de compréhension de l'effet des méthodes de gestion sur les populations d'oiseaux avant d'entreprendre ce type de travaux. En outre, tant que les populations d'oiseaux ne se révèlent pas en déclin sur la ROT, on peut discuter de la pertinence d'adapter les pratiques de gestion.

Continuer de suivre l'évolution des populations de limicoles qui fréquentent la ROT, afin de procéder à des travaux de réhabilitation (notamment contre l'envasement) lorsque l'attractivité sera en baisse, est certainement la perspective la plus équilibrée et la moins risquée qui puisse être envisagée, surtout en considérant que toute intervention sur les zones de quiétude occupées par les limicoles entraîne un dérangement que l'équipe technique cherche à minimiser.

8. RETOUR SUR EXPERIENCE

Ces six mois de stage ont été extrêmement enrichissants d'un point de vue personnel et professionnel. Cette expérience m'a avant tout permis de développer mes compétences techniques, via l'amélioration de ma fluidité d'utilisation de R et QGis, et thématiques via l'acquisition de nombreuses compétences ornithologiques. Dans une moindre mesure, cette expérience m'a également permis de découvrir la réalité de la gestion d'un site naturel ouvert au public (gestion des espèces envahissantes, optimisation de l'accueil des oiseaux et des visiteurs, conduite des suivis scientifiques...)

Autour de ces compétences très tangibles ont gravité d'autres savoir-faire. Les phases de diagnostic, conception, production et validation ont occupé une part importante de ce projet puisqu'elles ont jalonné toutes les phases de réflexion et d'analyses statistiques.

Géré en autonomie avec l'appui de mon tuteur de stage, ce projet a nécessité la mobilisation des compétences de gestion acquises au cours du cycle ingénieur, via la mise en place d'outils tels que les diagrammes de PERT¹ et GANTT¹ afin de garantir la bonne affectation du temps à chaque tâche.

¹ Program Evaluation and Review Technique

Enfin, afin de tenir informé le reste de l'équipe moins familier avec les opérations statistiques, il a été nécessaire d'adapter la communication des résultats à divers publics plus ou moins spécialistes.

Ce stage m'a enfin permis de développer des savoir-être utiles à la fonction d'ingénieure : autonomie, assertivité et prise d'initiatives ont été nécessaires pour avancer tout au long de ce projet, bien que ces besoins aient justement parfois constitué quelques difficultés.

¹ Generalized Activity Normalization Time Table

9. CONCLUSION

L'utilisation des biostatistiques afin de tirer profit des données de comptage a permis de révéler plusieurs paramètres expliquant les variations des effectifs d'oiseaux sur la Réserve Ornithologique du Teich.

Pour cela, les données de comptage ont été compilées et standardisées afin d'assurer l'homogénéité des protocoles et de créer une série temporelle exploitable qui soit la plus longue possible. Les comptages historiques ont été sélectionnés selon les critères qui justifient la programmation des comptages actuels, les commentaires ont été homogénéisés et les données incorrectes ont été écartées. Plusieurs analyses ont été conduites sur ce jeu de données résultant, visant à explorer trois thèmes principaux, relatifs aux évolutions temporelles, à la répartition spatiale et aux facteurs environnementaux influençant les populations d'oiseaux qui fréquentent la ROT.

Il a été observé que les résultats de ces analyses dépendent fortement de chaque espèce, mais également du nombre de données accessibles. Des paramètres, tels que les coefficients de marée ou la demi-journée du comptage, présentent des effets significatifs sur certaines espèces tandis qu'aucun effet n'apparaît sur d'autres. D'autres variables, comme le changement climatique, affectent l'intégralité de la communauté, comme cela a pu être constaté sur d'autres sites, tandis que les conditions météorologiques ne semblent présenter aucune influence significative.

Ce travail ayant été le tout premier réalisé à partir des données de la Réserve, il demeure toutefois incomplet et de nombreuses perspectives d'amélioration sont envisageables, qu'il s'agisse de compléter les analyses effectuées par d'autres axes, ou d'améliorer leur robustesse en y confrontant d'autres méthodes ou des données complémentaires.

En particulier, quantifier l'effet des pratiques de gestion sur la Réserve Ornithologique du Teich pourrait apporter une véritable plus-value au travail réalisé. Cela permettrait de comprendre si, et à quel point la gestion du site prime les facteurs environnementaux, sur lesquels il est impossible d'agir, et ainsi de l'adapter afin de maximiser son attractivité pour les oiseaux sauvages. Confronter ce projet à des études menées sur d'autres sites analogues pourrait présenter un intérêt dans l'adaptation des pratiques de gestion.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Réserve Ornithologique du Teich (dernière mise à jour : janvier 2022). Liste des oiseaux observés sur la réserve Ornithologique du Teich de 1972 à 2021. Disponible en ligne : <https://cutt.ly/2AzJrjC>
- [2] Wetlands International (1995). Waterbird Population Estimates. Disponible en ligne : <http://wpp.wetlands.org/data/Threshold>
- [3] Secrétariat de la Convention de Ramsar (2004). Le Manuel de la Convention de Ramsar : Guide de la Convention sur les zones humides (Ramsar, Iran, 1971), 3 e éd., p. 46. Secrétariat de la Convention de Ramsar, Gland, Suisse. Disponible en ligne : https://www.oieau.org/eaudoc/system/files/documents/39/196399/196399_doc.pdf
- [4] Réserve Ornithologique du Teich (2017). Plan d'Orientation 2017-2026. Tome 1 « Etat des lieux », p. 25-35, 45-46.
- [5] Barraquand F., Picoche C., Aluome C., Carassou L. & Feigné C. (2022) Looking for Compensation at Multiple Scales in a Wetland Bird Community. *Ecology and Evolution* 12.6 : E8876-N/a. Web.
- [6] Secrétariat de la Convention de Ramsar, 2006. Le Manuel de la Convention de Ramsar: Guide de la Convention sur les zones humides (Ramsar, Iran, 1971), 4e édition. Secrétariat de la Convention de Ramsar, Gland, Suisse. Disponible en ligne : https://www.iucn.org/sites/dev/files/import/downloads/lib_manual2006f.pdf?fbclid=IwAR2sHAcM1ZwHgzVdOogBMFiDqr84MkdiRn16NxaNwNzOamrRTN4mrBQdEIA
- [7] Bon C. & Caillot E. (2018). Développement d'un « indicateur limicoles côtiers » pour le tableau de bord des aires marines protégées. Observatoire du Patrimoine Naturel Littoral, Réserves Naturelles de France – Agence Française pour la Biodiversité - Ecole Pratique des Hautes Etudes - Centre National de Recherche Scientifique - Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive. 345p. Disponible en ligne : <https://www.reserves-naturelles.org/rnf/projets/opnl-limicoles-cotiers-indicateurs>
- [8] Muséum National d'Histoire Naturelle, Centre d'Ecologie et des Sciences de la Conservation, Ligue pour la Protection des Oiseaux, Réserves Naturelles de France (1989, mise à jour 2001). STOC-Sites – Réserves Naturelles de France : Instructions. Disponible en ligne : <https://cdnfiles1.biolovision.net/www.faune-france.org/userfiles/FauneFrance/FFAltasEngutes/STOC-SITERNFficheInstructions.pdf>
- [9] Centre de Recherches sur la Biologie des Populations d'Oiseaux (1989, mise à jour 2020). Protocole Suivi Temporel des Oiseaux Communs par Capture : STOC Capture. Disponible en ligne : https://crbpo.mnhn.fr/IMG/pdf/protocole_stoc_capture_v3_8.pdf
- [10] Centre de Recherches sur la Biologie des Populations d'Oiseaux (2014, mise à jour 2020). Protocole PHENOLOGIE migratoire. Disponible en ligne : https://crbpo.mnhn.fr/IMG/pdf/protocole_pheno_v1_7.pdf
- [11] Bensettiti F. (coord.) & al. (2001). « Cahiers d'habitats » Natura 2000. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire. MEDD/MAAPAR/MNHN. Éd. La Documentation française, Paris. Disponibles en ligne : <https://inpn.mnhn.fr/telechargement/documentation/natura2000/cahiers-habitats>
- [12] E. Davies C., Moss D. & O'Hill M. (2004). EUNIS Habitat Classification Revised. Agence Européenne de l'Environnement. Disponible en ligne : <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/eunis-habitat-classification-1>

- [13] Devillers P., Devillers-Terschuren J., Ledant J.-P. & coll. (1991). CORINE biotopes manual. Habitats of the European Community. Data specifications - Part 2. EUR 12587/3 EN. European Commission, Luxembourg, 300 p. Traduction pour les types d'habitats présents en France : Bissardon M., Guibal L. & Rameau J.-C. (1997). Corine biotopes. Version originale. Types d'habitats français. ENGREF, Nancy, 217 p. Mise en table : UMS PatriNat / INPN, septembre 2019. Disponible en ligne : https://inpn.mnhn.fr/habitat/cd_typo/22
- [14] BirdLife International and Handbook of the Birds of the World (2021). Bird species distribution maps of the world. Version 2021.1. Available at <http://datazone.birdlife.org/species/requestdis>.
- [15] Fick, S.E. & Hijmans R.J. (2017). WorldClim 2 : new 1 km spatial resolution climate surfaces for global land areas. Disponible en ligne : <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.5086>
- [16] Theillout, A. & Collectif faune-aquitaine.org (2015). Atlas des oiseaux nicheurs d'Aquitaine. LPO Aquitaine, Delachaux et Niestlé.
- [17] Theillout A., Besnard A., Delfour F. & Barande S. (coord.) (2020). Atlas des oiseaux migrateurs et hivernants d'Aquitaine. Dordogne, Gironde, Landes, Lot-et-Garonne, Pyrénées-Atlantiques. Muséum Nationale d'Histoire Naturelle, Paris ; LPO, Rochefort, Patrimoines Naturels.
- [18] Devictor V., Julliard R., Couvet D. & Jiguet F. (2008). "Birds are tracking climate warming, but not fast enough." *Proceedings of the Royal Society. B, Biological Sciences* 275.1652 (2008) : 2743-748. Web.
- [19] Gaüzère P., Barbaro L., Calatayud F., Princé K., Devictor V., Raison L., Sirami C. & Balent G. (2020). "Long-term Effects of Combined Land-use and Climate Changes on Local Bird Communities in Mosaic Agricultural Landscapes." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 289 (2020) : 106722. Web.
- [20] CROCHET P.-A., LEBRETON J.-D. & BONHOMME F. (2002). Systematics of Large White-Headed Gulls: Patterns of Mitochondrial DNA Variation in Western European Taxa. *The Auk* 119.3 : 603-20. Web.
- [21] Ntiama-Baidu Y., Piersma T., Wiersma P., Poot M., Battley P., & Gordon C. (1998). Water depth selection, daily feeding routines and diets of waterbirds in coastal lagoons in Ghana. *Ibis*, 140(1), 89-103. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.1998.tb04545.x>
- [22] Fredrickson L. H. (1991). Strategies for Water Level Manipulations in Moist-soil Systems. *Waterfowl Management Handbook*. 26. <https://digitalcommons.unl.edu/icwdmwfm/26>.
- [23] Migraction, Biovision (2003-2022). Les stratégies des migrateurs. Web : https://www.migraction.net/index.php?m_id=22006&item=6
- [24] Godet L., Jaffré M. & Devictor V. (2011). "Waders in Winter : Long-term Changes of Migratory Bird Assemblages Facing Climate Change." *Biology Letters* (2005) 7.5 (2011): 714-17. Web. DOI : 10.1098/rsbl.2011.0152.
- [25] Observatoire des Risques de la Région Nouvelle-Aquitaine (2021). Rubrique Risques / Changement climatique. Web : <https://observatoire-risques-nouvelle-aquitaine.fr/risques/changement-climatique/>

Références des logiciels employés :

R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL : <https://www.R-project.org/>.

QGIS Development Team (2022). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. URL : <http://qgis.osgeo.org>

ANNEXES

Annexe 1 : Table des lois

Liste française des espèces chassables :

A. 26 juin 1987, fixant la liste des espèces de gibier dont la chasse est autorisée, NOR : DEVN0816513A, ELI : <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2008/7/30/DEVN0816513A/jo/texte>, Article 1.

Législation relative à la chasse du Courlis cendré :

A. 30 juill. 2008, relatif à la suspension de la chasse de certaines espèces de gibier, NOR : DEVN0816513A, ELI : <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2008/7/30/DEVN0816513A/jo/texte>.

A. 3 févr. 2012, modifiant l'arrêté du 30 juillet 2008 relatif à la suspension de la chasse de certaines espèces de gibier, NOR : DEVL1203355A, ELI : <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2012/2/3/DEVL1203355A/jo/texte>.

A. 24 juill. 2013, relatif à la suspension de la chasse de certaines espèces de gibier en France métropolitaine, NOR : DEVL1312194A.

A. 1er août 2018, relatif à la suspension de la chasse de certaines espèces de gibier en France métropolitaine, NOR : TREL1820083A, ELI : <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2018/8/1/TREL1820083A/jo/texte>.

CE, [5^e-6^e] ch. réunies, 12 juill. 2019, n° 424600, ECLI : FR:CECHR:2019:424600.20190712.

A. 31 juill. 2019, relatif à la chasse du Courlis cendré en France métropolitaine pendant la saison 2019-2020, NOR : TREL1922038A, ELI : <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2019/7/31/TREL1922038A/jo/texte>.

CE, 26 août 2019, n° 433434, ECLI : FR:CEORD:2019:433434.20190826.

A. 27 juill. 2020, relatif à la chasse du Courlis cendré en France métropolitaine pendant la saison 2020-2021, NOR : TREL2019608A, ELI : <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2020/7/27/TREL2019608A/jo/texte>.

A. 12 juill. 2021, relatif à la chasse du Courlis cendré en France métropolitaine pour la saison 2021-2022, NOR : TREL2110943A, ELI : <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2021/7/12/TREL2110943A/jo/texte>.

A. 29 juill. 2022, suspendant la chasse du Courlis cendré en France métropolitaine pour la saison 2022-2023, NOR : TREL2214209A, ELI : <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2022/7/29/TREL2214209A/jo/texte>.

Législation relative à la chasse de la Barge à queue noire :

A. 30 juill. 2008, relatif à la suspension de la chasse de certaines espèces de gibier, NOR : DEVN0816513A, ELI : <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2008/7/30/DEVN0816513A/jo/texte>.

A. 3 févr. 2012, modifiant l'arrêté du 30 juillet 2008 relatif à la suspension de la chasse de certaines espèces de gibier, NOR : DEVL1203355A, ELI : <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2012/2/3/DEVL1203355A/jo/texte>.

A. 24 juill. 2013, relatif à la suspension de la chasse de certaines espèces de gibier en France métropolitaine, NOR : DEVL1312194A.

A. 1er août 2018, relatif à la suspension de la chasse de certaines espèces de gibier en France métropolitaine, NOR : TREL1820083A, ELI : <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2018/8/1/TREL1820083A/jo/texte>.

CE, [5^e-6^e] ch. réunies, 12 juill. 2019, n° 424600, ECLI : FR:CECHR:2019:424600.20190712.

A. 31 juill. 2019, relatif à la suspension de la chasse de la Barge à queue noire en France métropolitaine pendant la saison 2019-2020, NOR : TREL1922035A, ELI : <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2019/7/31/TREL1922035A/jo/texte>.

A. 27 juill. 2020, relatif à la suspension de la chasse de la Barge à queue noire en France métropolitaine pendant la saison 2020-2021, NOR : TREL2019607A, ELI : <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2020/7/27/TREL2019607A/jo/texte>.

A. 12 juill. 2021, relatif à la chasse de la Barge à queue noire en France métropolitaine pendant la saison 2021-2022, NOR : TREL2110942A, ELI : <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2021/7/12/TREL2110942A/jo/texte>.

A. 29 juill. 2022 suspendant la chasse de la Barge à queue noire en France métropolitaine pour la saison 2022-2023, NOR : TREL2214207A, ELI : <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2022/7/29/TREL2214207A/jo/texte>.

Loi dite « Loi Littoral »

L. n° 86-2, 3 janv. 1986, relative à l'aménagement, la protection et la mise en valeur du littoral, ELI : <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000317531/>

Directive Oiseaux

Dir. 79/409/CEE, 25 avr. 1979, concernant la conservation des oiseaux sauvages

Directive Habitats

Dir. 92/43/CEE, 21 mai 1992, concernant la conservation des habitats naturels ainsi que de la faune et de la flore sauvages

Annexe 2 : Liste des 326 espèces contactées sur la Réserve Ornithologique du Teich.

Correspondance des statuts ci-dessous :

N = Nicheur (régulier)

NR = Nicheur rare (au moins 1 cas depuis 1972)

ND = Nicheur disparu (aucun cas depuis 5 ans)

M = Migrateur (régulier)

MR = Migrateur rare (5 à 15 cas depuis 1972)

H = Hivernant (régulier)

HR = Hivernant rare (5 à 15 cas depuis 1972).

TR = Très rare (1 à 4 observations depuis 1972)

Les espèces soulignées sont inscrite à l'Annexe I de la Directive Oiseaux.

Les espèces surlignées sont celles pour lesquelles la ROT a atteint le seuil d'importance nationale (**vert**), internationale (**violet**) ou les deux (**orange**).

Nom vernaculaire	Nom scientifique	Statut ROT	Liste rouge France			Dernière observation
			N	M	H	
Cygne tuberculé	<i>Cygnus olor</i>	N	LC	-	-	
Cygne noir	<i>Cygnus atratus</i>	TR	-	-	-	Nov. 2021
<u>Cygne de Bewick</u>	<i>Cygnus columbianus</i>	TR	-	-	EN	
<u>Cygne chanteur</u>	<i>Cygnus cygnus</i>	TR	-	-	-	Jan. 2013
Oie des moissons	<i>Anser fabalis</i>	TR	-	-	VU	Fev. 2013
Oie à bec court	<i>Anser brachyrhynchus</i>	TR	-	-	-	Jan. 2011
Oie rieuse	<i>Anser albifrons</i>	TR	-	-	-	Nov. 2013
Oie cendrée	<i>Anser anser</i>	N	VU	-	LC	
Bernache du Canada	<i>Branta canadensis</i>	N	-	-	-	
Bernache à ventre sombre	— <i>Branta bernicla bernicla</i>	HR	-	-	-	
<u>Bernache nonnette</u>	<i>Branta leucopsis</i>	TR	-	-	-	Juin. 2018
<u>Ouette d'Egypte</u>	<i>Alopochen aegyptiaca</i>	TR	-	-	-	
Tadorne casarca	<i>Tadorna ferruginea</i>	TR	-	-	-	Mai. 2020
Tadorne de Belon	<i>Tadorna tadorna</i>	N	LC	-	LC	
Canard carolin	<i>Aix sponsa</i>	TR	-	-	-	
Canard mandarin	<i>Aix galericulata</i>	TR	-	-	-	
Canard siffleur	<i>Anas penelope</i>	H	-	-	LC	
Canard à front blanc	<i>Anas americana</i>	TR	-	-	-	Avr. 2011
Canard chipeau	<i>Anas strepera</i>	H/ND	LC	-	LC	
Sarcelle d'hiver	<i>Anas crecca</i>	H/NR	VU	-	LC	
Canard colvert	<i>Anas platyrhynchos</i>	N	LC	-	LC	
<u>Canard pilet</u>	<i>Anas acuta</i>	H/NR	-	-	LC	
Sarcelle d'été	<i>Anas querquedula</i>	M/ND	VU	NT	-	
Sarcelle à ailes bleues	<i>Anas discors</i>	TR	-	-	-	Avr. 2000
<u>Canard souchet</u>	<i>Anas clypeata</i>	H/ND	LC	-	LC	
Nette rousse	<i>Netta rufina</i>	M/ND	LC	-	LC	
Fuligule milouin	<i>Aythya ferina</i>	H/ND	VU	-	LC	
Fuligule à bec cerclé	<i>Aythya collaris</i>	TR	-	-	-	
<u>Fuligule nyroca</u>	<i>Aythya nyroca</i>	TR	-	-	-	Dec. 1985
Fuligule morillon	<i>Aythya fuligula</i>	H	LC	-	NT	
Fuligule milouinan	<i>Aythya marila</i>	HR	-	-	NT	
Eider à duvet	<i>Somateria mollissima</i>	TR	CR	-	-	Aou. 2010
Eider à tête grise	<i>Somateria spectabilis</i>	TR	-	-	-	Avr. 2022
Macreuse noire	<i>Melanitta nigra</i>	TR	-	-	LC	Nov. 2011
Macreuse brune	<i>Melanitta fusca</i>	TR	-	-	EN	
Garrot à œil d'or	<i>Bucephala clangula</i>	TR	-	-	-	Juil. 2019
Harelde boréale	<i>Clangula hyemalis</i>	TR	-	-	-	Avr. 1989
<u>Harle piette</u>	<i>Mergellus albellus</i>	TR	-	-	VU	Jan. 1986

Nom vernaculaire	Nom scientifique	Statut ROT	Liste rouge France			Dernière observation
			N	M	H	
Harle huppé	<i>Mergus serrator</i>	HR	CR	-	LC	
Harle bièvre	<i>Mergus merganser</i>	HR	NT	-	LC	Avr. 2016
Erismature rousse	<i>Oxyura jamaicensis</i>	TR	-	-	-	
Perdrix rouge	<i>Alectoris rufa</i>	TR	LC	-	-	
Caille des blés	<i>Coturnix coturnix</i>	M	LC	-	-	
Faisan de Colchide	<i>Phasianus colchicus</i>	TR	LC	-	-	
Plongeon catmarin	<i>Gavia stellata</i>	MR	-	-	-	Avr. 2016
Plongeon arctique	<i>Gavia arctica</i>	MR	-	-	-	Nov. 2019
Plongeon imbrin	<i>Gavia immer</i>	MR	-	-	VU	
Grèbe castagneux	<i>Tachybaptus ruficollis</i>	N/H	LC	-	-	
Grèbe huppé	<i>Podiceps cristatus</i>	H	LC	-	-	
Grèbe jougris	<i>Podiceps grisegena</i>	TR	CR	-	-	Dec. 2013
Grèbe esclavon	<i>Podiceps auritus</i>	TR	-	-	VU	Mar. 2018
Grèbe à cou noir	<i>Podiceps nigricollis</i>	H	LC	-	LC	
Océanite tempête	<i>Hydrobates pelagicus</i>	MR	VU	-	-	Nov. 2019
Océanite culblanc	<i>Oceanodroma leucorhoa</i>	MR	-	-	-	Oct. 2020
Fou de Bassan	<i>Morus bassanus</i>	TR	NT	-	-	Jan. 2016
Grand Cormoran	<i>Phalacrocorax carbo</i>	H	LC	-	LC	
Grand Cormoran continental	<i>Phalacrocorax carbo sinensis</i>	ND	-	-	-	
Butor étoilé	<i>Botaurus stellaris</i>	HR/M	VU	-	-	
Blongios nain	<i>Ixobrychus minutus</i>	ND	EN	-	-	
Bihoreau gris	<i>Nycticorax nycticorax</i>	ND/H	NT	-	-	
Crabier chevelu	<i>Ardeola ralloides</i>	MR	LC	-	-	Aou. 2016
Héron garde-bœufs	<i>Bubulcus ibis</i>	H/ND	LC	-	-	
Aigrette des récifs	<i>Egretta gularis</i>	TR	-	-	-	
Aigrette garzette	<i>Egretta garzetta</i>	H/ND	LC	-	-	
Grande Aigrette	<i>Casmerodius albus</i>	H	NT	-	LC	
Héron cendré	<i>Ardea cinerea</i>	N	LC	-	-	
Héron pourpré	<i>Ardea purpurea</i>	MR	LC	-	-	
Cigogne noire	<i>Ciconia nigra</i>	MR	EN	VU	-	Fev. 2021
Cigogne blanche	<i>Ciconia ciconia</i>	N	LC	-	-	
Ibis falcinelle	<i>Plegadis falcinellus</i>	MR	-	-	-	Avr. 2022
Ibis sacré	<i>Threskiornis aethiopicus</i>	MR	-	-	-	Nov. 2021
Spatule blanche	<i>Platalea leucorodia</i>	M/H/ND	NT	-	VU	
Flamant rose	<i>Phoenicopterus roseus</i>	MR	VU	-	NA	Aou. 2022
Bondrée apivore	<i>Pernis apivorus</i>	M	LC	LC	-	
Elanion blanc	<i>Elaeetus caeruleus</i>	MR	-	-	-	Sep. 2021
Milan noir	<i>Milvus migrans</i>	N	LC	-	-	
Milan royal	<i>Milvus milvus</i>	M	VU	-	VU	
Pygargue à queue blanche	<i>Haliaeetus albicilla</i>	TR	CR	-	-	Oct. 2015
Vautour fauve	<i>Gyps fulvus</i>	TR	LC	-	-	Juil. 2010
Circaète Jean-le-blanc	<i>Circaetus gallicus</i>	M	LC	-	-	
Busard des roseaux	<i>Circus aeruginosus</i>	H	NT	-	-	
Busard Saint-Martin	<i>Circus cyaneus</i>	H/M	LC	-	-	
Busard cendré	<i>Circus pygargus</i>	M	NT	-	-	
Autour des palombes	<i>Accipiter gentilis</i>	H	LC	-	-	
Epervier d'Europe	<i>Accipiter nisus</i>	N	LC	-	-	
Buse variable	<i>Buteo buteo</i>	N	LC	-	-	
Aigle criard	<i>Aquila clanga</i>	TR	-	-	-	Sep. 2009
Aigle botté	<i>Hieraetus pennatus</i>	M	NT	-	-	
Balbuzard pêcheur	<i>Pandion haliaetus</i>	M	VU	LC	-	
Faucon crécerelle	<i>Falco tinnunculus</i>	HR	NT	-	-	
Faucon kobez	<i>Falco vespertinus</i>	TR	-	-	-	Mai. 2008
Faucon émerillon	<i>Falco columbarius</i>	M	-	-	-	
Faucon hobereau	<i>Falco subbuteo</i>	M	LC	-	-	
Faucon d'Éléonore	<i>Falco eleonora</i>	TR	-	-	-	Oct. 2021
Faucon pèlerin	<i>Falco peregrinus</i>	H	LC	-	-	
Faucon pèlerin "calidus"	<i>Falco peregrinus calidus</i>	HR	-	-	-	Nov. 2013
Râle d'eau	<i>Rallus aquaticus</i>	N	NT	-	-	
Marouette ponctuée	<i>Porzana porzana</i>	M	VU	-	-	

Nom vernaculaire	Nom scientifique	Statut ROT	Liste rouge France			Dernière observation
			N	M	H	
<u>Marouette poussin</u>	<i>Porzana parva</i>	TR	CR	-	-	
<u>Marouette de Baillon</u>	<i>Porzana pusilla</i>	TR	CR	-	-	Aou. 2007
<u>Râle des genêts</u>	<i>Crex crex</i>	TR	EN	-	-	
<u>Gallinule poule-d'eau</u>	<i>Gallinula chloropus</i>	N	LC	-	-	
<u>Talève sultane</u>	<i>Porphyrio porphyrio</i>	TR	VU	-	-	Sep. 2015
<u>Foulque macroule</u>	<i>Fulica atra</i>	N	LC	-	-	
<u>Grue cendrée</u>	<i>Grus grus</i>	M	CR	-	NT	
<u>Outarde canepetière</u>	<i>Tetrax tetrax</i>	MR	CR	-	-	
<u>Huîtrier pie</u>	<i>Haematopus ostralegus</i>	M	LC	-	LC	
<u>Echasse blanche</u>	<i>Himantopus himantopus</i>	N	LC	-	-	
<u>Avocette élégante</u>	<i>Recurvirostra avosetta</i>	H	LC	-	LC	
<u>Œdicnème criard</u>	<i>Burhinus oedicnemus</i>	M	LC	-	-	Mai. 2020
<u>Courvite isabelle</u>	<i>Cursorius cursor</i>	TR	-	-	-	
<u>Glaréole à collier</u>	<i>Glareola pratincola</i>	TR	EN	-	-	Mai. 2019
<u>Petit Gravelot</u>	<i>Charadrius dubius</i>	N	LC	-	-	
<u>Grand Gravelot</u>	<i>Charadrius hiaticula</i>	H	VU	-	LC	
<u>Gravelot kildir</u>	<i>Charadrius vociferus</i>	TR	-	-	-	Nov. 1978
<u>Gravelot à collier interrompu</u>	<i>Charadrius alexandrinus</i>	M	VU	-	-	
<u>Pluvier guignard</u>	<i>Charadrius morinellus</i>	MR	RE	NT	-	Sep. 2021
<u>Pluvier fauve</u>	<i>Pluvialis fulva</i>	TR	-	-	-	Aou. 2016
<u>Pluvier doré</u>	<i>Pluvialis apricaria</i>	M	-	-	LC	
<u>Pluvier argenté</u>	<i>Pluvialis squatarola</i>	H	-	-	LC	
<u>Vanneau sociable</u>	<i>Chettusia gregaria</i>	TR	-	-	-	Sep. 2011
<u>Vanneau huppé</u>	<i>Vanellus vanellus</i>	H	NT	-	LC	
<u>Bécasseau maubèche</u>	<i>Calidris canutus</i>	H	-	-	NT	
<u>Bécasseau sanderling</u>	<i>Calidris alba</i>	H	-	-	LC	
<u>Bécasseau semipalmé</u>	<i>Calidris pusilla</i>	TR	-	-	-	Avr. 2014
<u>Bécasseau à cou roux</u>	<i>Calidris ruficollis</i>	TR	-	-	-	Mai. 2011
<u>Bécasseau minute</u>	<i>Calidris minuta</i>	H	-	LC	-	
<u>Bécasseau de Temminck</u>	<i>Calidris temminckii</i>	M	-	-	-	
<u>Bécasseau de Bonaparte</u>	<i>Calidris fuscicollis</i>	TR	-	-	-	Aou. 2011
<u>Bécasseau de Baird</u>	<i>Calidris bairdii</i>	TR	-	-	-	Nov. 2003
<u>Bécasseau tacheté</u>	<i>Calidris melanotos</i>	MR	-	-	-	Aou. 2013
<u>Bécasseau cocorli</u>	<i>Calidris ferruginea</i>	M	-	LC	-	
<u>Bécasseau à échasses</u>	<i>Micropalama himantopus</i>	TR	-	-	-	Jui. 2013
<u>Bécasseau violet</u>	<i>Calidris maritima</i>	MR	-	-	-	Nov. 2012
<u>Bécasseau variable</u>	<i>Calidris alpina</i>	H	-	-	LC	
<u>Bécasseau falcinelle</u>	<i>Limicola falcinellus</i>	TR	-	-	-	Avr. 2011
<u>Bécasseau rousset</u>	<i>Tryngites subruficollis</i>	MR	-	-	-	Oct. 2018
<u>Combattant varié</u>	<i>Philomachus pugnax</i>	M	-	NT	-	
<u>Bécassine sourde</u>	<i>Lymnocyrtus minimus</i>	H	-	-	-	
<u>Bécassine des marais</u>	<i>Gallinago gallinago</i>	H/ND	CR	-	-	
<u>Bécassine double</u>	<i>Gallinago media</i>	TR	-	-	-	Avr. 2014
<u>Bécassin à long bec</u>	<i>Limnodromus scolopaceus</i>	TR	-	-	-	Avr. 2001
<u>Bécasse des bois</u>	<i>Scolopax rusticola</i>	H	LC	-	LC	
<u>Barge à queue noire</u>	<i>Limosa limosa</i>	H	VU	VU	NT	
<u>Barge rousse</u>	<i>Limosa lapponica</i>	H	-	-	LC	
<u>Courlis corlieu</u>	<i>Numenius phaeopus</i>	M	-	VU	-	
<u>Courlis cendré</u>	<i>Numenius arquata</i>	H	VU	-	LC	
<u>Chevalier arlequin</u>	<i>Tringa erythropus</i>	H	-	-	-	
<u>Chevalier gambette</u>	<i>Tringa totanus</i>	H	LC	LC	-	
<u>Chevalier stagnatilis</u>	<i>Tringa stagnatilis</i>	M	-	-	-	
<u>Chevalier aboyeur</u>	<i>Tringa nebularia</i>	H	-	LC	-	
<u>Chevalier à pattes jaunes</u>	<i>Tringa flavipes</i>	TR	-	-	-	Sep. 2019
<u>Chevalier culblanc</u>	<i>Tringa ochropus</i>	M	-	LC	-	
<u>Chevalier sylvain</u>	<i>Tringa glareola</i>	M	-	LC	-	
<u>Chevalier bargette</u>	<i>Xenus cinereus</i>	TR	-	-	-	Juil. 2012
<u>Chevalier guignette</u>	<i>Actites hypoleucos</i>	M	NT	-	-	
<u>Tournepierrre à collier</u>	<i>Arenaria interpres</i>	H	-	-	LC	
<u>Phalarope de Wilson</u>	<i>Phalaropus tricolor</i>	TR	-	-	-	Aou. 2011

Nom vernaculaire	Nom scientifique	Statut ROT	Liste rouge France			Dernière observation
			N	M	H	
<u>Phalarope à bec étroit</u>	<i>Phalaropus lobatus</i>	MR	-	-	-	Mai. 2021
Phalarope à bec large	<i>Phalaropus fulicarius</i>	MR	-	-	-	Sep. 2021
Labbe pomarin	<i>Stercorarius pomarinus</i>	TR	-	LC	-	
Labbe parasite	<i>Stercorarius parasiticus</i>	MR	-	LC	-	Jan. 2016
Grand Labbe	<i>Catharacta skua</i>	MR	-	LC	-	Nov. 2019
Mouette de Sabine	<i>Xema sabini</i>	TR	-	-	-	Sep. 1994
Mouette tridactyle	<i>Rissa tridactyla</i>	TR	VU	-	-	Juil. 2020
<u>Goéland railleur</u>	<i>Chroicocephalus genei</i>	TR	VU	-	-	Juil. 2012
Mouette de Bonaparte	<i>Chroicocephalus philadelphia</i>	TR	-	-	-	Mai. 2011
Mouette rieuse	<i>Chroicocephalus ridibundus</i>	H/ND	NT	-	LC	
<u>Mouette pygmée</u>	<i>Hydrochelidon minutus</i>	M	-	-	LC	
<u>Mouette mélanocéphale</u>	<i>Larus melanocephalus</i>	M	LC	-	-	
<u>Goéland d'Audouin</u>	<i>Larus audouinii</i>	TR	EN	-	-	Juin. 2020
Goéland cendré	<i>Larus canus</i>	M	EN	-	LC	
Goéland à bec cerclé	<i>Larus delawarensis</i>	TR	-	-	-	Dec. 2016
Goéland brun "graellsii"	<i>Larus fuscus graellsii</i>	N	LC	-	LC	
Goéland argenté	<i>Larus argentatus</i>	H/ND	NT	-	-	
Goéland leucophaea	<i>Larus michahellis</i>	N	LC	-	-	
Goéland pontique	<i>Larus cachinnans</i>	TR	-	-	-	Jan. 2018
Goéland à ailes blanches	<i>Larus glaucoideus</i>	TR	-	-	-	Fev. 2009
Goéland de Kumlien	<i>Larus glaucoideus kumlieni</i>	TR	-	-	-	Mar. 2009
Goéland bourgmestre	<i>Larus hyperboreus</i>	TR	-	-	-	Fev. 2018
Goéland marin	<i>Larus marinus</i>	N	LC	-	-	
<u>Sterne naine</u>	<i>Sterna albifrons</i>	M	LC	LC	-	
<u>Sterne hansel</u>	<i>Gelochelidon nilotica</i>	MR	VU	-	-	Juin. 2022
<u>Sterne caspienne</u>	<i>Hydroprogne caspia</i>	MR	-	NT	-	
<u>Sterne caugek</u>	<i>Thalasseus sandvicensis</i>	H	NT	LC	-	
<u>Sterne pierregarin</u>	<i>Sterna hirundo</i>	M	LC	LC	-	
<u>Sterne arctique</u>	<i>Sterna paradisaea</i>	M	CR	LC	-	Sep. 2017
<u>Sterne de Dougall</u>	<i>Sterna dougallii</i>	TR	CR	NT	-	Mai. 2009
<u>Sterne élégante</u>	<i>Sterna elegans</i>	TR	-	-	-	Juin. 2019
<u>Guifette moustac</u>	<i>Chlidonias hybridus</i>	M	VU	-	-	
<u>Guifette noire</u>	<i>Chlidonias niger</i>	M	EN	-	-	
Guifette leucoptère	<i>Chlidonias leucopterus</i>	TR	-	-	-	Aou. 2022
Guillemot de Troil	<i>Uria aalge</i>	TR	EN	-	-	
Mergule nain	<i>Alle alle</i>	TR	-	-	-	
Pigeon colombin	<i>Columba oenas</i>	M	LC	-	-	
Pigeon ramier	<i>Columba palumbus</i>	N	LC	-	LC	
Tourterelle turque	<i>Streptopelia decaocto</i>	N	LC	-	-	
Tourterelle des bois	<i>Streptopelia turtur</i>	M	VU	-	-	
Perruche à collier	<i>Psittacula krameri</i>	TR	-	-	-	
Coucou geai	<i>Clamator glandarius</i>	TR	LC	-	-	Mai. 2019
Coucou gris	<i>Cuculus canorus</i>	N	LC	-	-	
Effraie des clochers	<i>Tyto alba</i>	H	LC	-	-	
Chevêche d'Athéna	<i>Athene noctua</i>	ND	LC	-	-	
Chouette hulotte	<i>Strix aluco</i>	N	LC	-	-	
Hibou moyen-duc	<i>Asio otus</i>	MR	LC	-	-	
<u>Hibou des marais</u>	<i>Asio flammeus</i>	MR	VU	-	-	Jan. 2021
<u>Engoulevent d'Europe</u>	<i>Caprimulgus europaeus</i>	M	LC	-	-	
Martinet noir	<i>Apus apus</i>	M	NT	-	-	
Martinet pâle	<i>Apus pallidus</i>	TR	LC	-	-	Aou. 2022
Martinet à ventre blanc	<i>Tachymarptis melba</i>	TR	LC	-	-	
<u>Martin-pêcheur d'Europe</u>	<i>Alcedo atthis</i>	N	VU	-	-	
Guêpier d'Europe	<i>Merops apiaster</i>	MR	LC	-	-	
Huppe fasciée	<i>Upupa epops</i>	N	LC	-	-	
Torcol fourmilier	<i>Jynx torquilla</i>	N	LC	-	-	
Pic vert	<i>Picus viridis</i>	N	LC	-	-	
<u>Pic noir</u>	<i>Dryocopus martius</i>	H	LC	-	-	
<u>Pic épeiche</u>	<i>Dendrocopos major</i>	N	LC	-	-	
<u>Pic épeichette</u>	<i>Dendrocopos minor</i>	N	VU	-	-	

Nom vernaculaire	Nom scientifique	Statut ROT	Liste rouge France			Dernière observation
Cochevis huppé	<i>Galerida cristata</i>	M	LC	-	-	
			N	M	H	
Alouette lulu	<i>Lullula arborea</i>	M	LC	-	-	
Alouette des champs	<i>Alauda arvensis</i>	M	NT	-	-	
Hirondelle de rivage	<i>Riparia riparia</i>	M	LC	-	-	
Hirondelle rustique	<i>Hirundo rustica</i>	N	NT	-	-	
Hirondelle de fenêtre	<i>Delichon urbica</i>	M	NT	-	-	
Hirondelle rousseline	<i>Hirundo daurica</i>	MR	VU	-	-	Avr. 2018
Pipit de Richard	<i>Anthus richardi</i>	TR	-	-	-	Avr. 2011
Pipit rousseline	<i>Anthus campestris</i>	MR	LC	-	-	
Pipit des arbres	<i>Anthus trivialis</i>	M	LC	-	-	
Pipit farlouse	<i>Anthus pratensis</i>	H	VU	-	-	
Pipit à gorge rousse	<i>Anthus cervinus</i>	TR	-	-	-	Avr. 2011
Pipit spioncelle	<i>Anthus spinoletta</i>	H	LC	-	-	
Pipit maritime	<i>Anthus petrosus</i>	HR	NT	-	-	
Bergeronnette printanière "nominale"	— <i>Motacilla flava flava</i>	M	LC	-	-	
Bergeronnette nordique	— <i>Motacilla flava thunbergi</i>	TR	-	-	-	Avr. 2016
Bergeronnette d'Italie	— <i>Motacilla flava cinereocapilla</i>	TR	-	-	-	Avr. 2009
Bergeronnette flavéole	— <i>Motacilla flava flavissima</i>	MR	-	-	-	
Bergeronnette ibérique	— <i>Motacilla flava iberiae</i>	N	-	-	-	
Bergeronnette des ruisseaux	<i>Motacilla cinerea</i>	M	LC	-	-	
Bergeronnette grise "nominale"	— <i>Motacilla alba alba</i>	N	LC	-	-	
Bergeronnette de Yarrell	— <i>Motacilla alba yarrellii</i>	MR	-	-	-	
Troglodyte mignon	<i>Troglodytes troglodytes</i>	N	LC	-	-	
Accenteur mouchet	<i>Prunella modularis</i>	N	LC	-	-	
Accenteur alpin	<i>Prunella collaris</i>	TR	LC	-	-	Oct. 1982
Rougegorge familier	<i>Erithacus rubecula</i>	N	LC	-	-	
Rossignol philomèle	<i>Luscinia megarhynchos</i>	N	LC	-	-	
Gorgebleue de Nantes	— <i>Luscinia svecica namnetum</i>	N	LC	-	-	
Rougequeue noir	<i>Phoenicurus ochruros</i>	N	LC	-	-	
Rougequeue à front blanc	<i>Phoenicurus phoenicurus</i>	N	LC	-	-	
Tarier des prés	<i>Saxicola rubetra</i>	M	VU	-	-	
Tarier pâle	<i>Saxicola rubicola</i>	N	NT	-	-	
Traquet motteux "nominal"	— <i>Oenanthe oenanthe oenanthe</i>	M	NT	-	-	
Traquet du Groenland	— <i>Oenanthe oenanthe leucorhoa</i>	MR	-	-	-	
Merle à plastron	<i>Turdus torquatus</i>	M	LC	-	-	
Merle noir	<i>Turdus merula</i>	N	LC	-	-	
Grive litorne	<i>Turdus pilaris</i>	M	LC	-	LC	
Grive musicienne	<i>Turdus philomelos</i>	N	LC	-	-	
Grive mauvis	<i>Turdus iliacus</i>	M	-	-	LC	
Grive draine	<i>Turdus viscivorus</i>	M	LC	-	-	
Bouscarle de Cetti	<i>Cettia cetti</i>	N	NT	-	-	
Cisticole des joncs	<i>Cisticola juncidis</i>	N	VU	-	-	
Locustelle tachetée	<i>Locustella naevia</i>	ND	NT	-	-	
Locustelle fluviatile	<i>Locustella fluviatilis</i>	TR	-	-	-	Mai. 1995
Locustelle lusciniôide	<i>Locustella luscinioides</i>	M/ND	EN	-	-	
Phragmite aquatique	<i>Acrocephalus paludicola</i>	MR	-	VU	-	Aou. 2021
Phragmite des joncs	<i>Acrocephalus schoenobaenus</i>	M	LC	-	-	
Rousserolle effarvatte	<i>Acrocephalus scirpaceus</i>	N	LC	-	-	
Rousserolle verderolle	<i>Acrocephalus palustris</i>	MR	LC	-	-	Aou. 2021
Rousserolle turdoïde	<i>Acrocephalus arundinaceus</i>	ND/M	VU	-	-	
Hypolaïs polyglotte	<i>Hippolaïs polyglotta</i>	N	LC	-	-	
Fauvette à tête noire	<i>Sylvia atricapilla</i>	N	LC	-	-	

Nom vernaculaire	Nom scientifique	Statut ROT	Liste rouge France			Dernière observation
Fauvette des jardins	<i>Sylvia borin</i>	M/ ND	NT	-	-	
			N	M	H	
Fauvette grisette	<i>Sylvia communis</i>	N	LC	-	-	
Fauvette pitchou	<i>Sylvia undata</i>	ND	EN	-	-	
Pouillot à grands sourcils	<i>Phylloscopus inornatus</i>	TR	-	-	-	Oct. 2020
Pouillot de Bonelli	<i>Phylloscopus bonelli</i>	M	LC	-	-	
Pouillot siffleur	<i>Phylloscopus sibilatrix</i>	M	NT	-	-	
Pouillot véloce	<i>Phylloscopus collybita</i>	N	LC	-	-	
Pouillot fitis	<i>Phylloscopus trochilus</i>	M	NT	-	-	
Roitelet huppé	<i>Regulus regulus</i>	H	NT	-	-	
Roitelet à triple bandeau	<i>Regulus ignicapillus</i>	N	LC	-	-	
Gobemouche gris	<i>Muscicapa striata</i>	N	NT	-	-	
Gobemouche noir	<i>Ficedula hypoleuca</i>	M	VU	-	-	
Panure à moustaches	<i>Panurus biarmicus</i>	MR	LC	-	-	Aou. 2016
Orite à longue queue	<i>Aegithalos caudatus</i>	N	LC	-	-	
Mésange bleue	<i>Cyanistes caeruleus</i>	N	LC	-	-	
Mésange charbonnière	<i>Parus major</i>	N	LC	-	-	
Mésange huppée	<i>Lophophanes cristatus</i>	N	LC	-	-	
Mésange noire	<i>Periparus ater</i>	H	LC	-	-	
Mésange nonnette	<i>Poecile palustris</i>	H	LC	-	-	
Sittelle torchepot	<i>Sitta europaea</i>	N	LC	-	-	
Grimpereau des jardins	<i>Certhia brachydactyla</i>	N	LC	-	-	
Rémiz penduline	<i>Remiz pendulinus</i>	MR	CR	-	-	Dec. 2021
Loriot d'Europe	<i>Oriolus oriolus</i>	N	LC	-	-	
Pie-grièche écorcheur	<i>Lanius collurio</i>	M/ND	NT	-	-	
Pie-grièche grise	<i>Lanius excubitor</i>	MR	EN	-	-	
Pie-grièche à tête rousse	<i>Lanius senator</i>	MR	VU	-	-	Avr. 2022
Geai des chênes	<i>Garrulus glandarius</i>	N	LC	-	-	
Pie bavarde	<i>Pica pica</i>	N	LC	-	-	
Choucas des tours	<i>Corvus monedula</i>	TR	LC	-	-	
Corbeau freux	<i>Corvus frugilegus</i>	TR	LC	-	LC	
Corneille noire	<i>Corvus corone</i>	N	LC	-	-	
Grand Corbeau	<i>Corvus corax</i>	TR	LC	-	-	Sep. 2012
Étourneau sansonnet	<i>Sturnus vulgaris</i>	N	LC	-	LC	
Étourneau unicolore	<i>Sturnus unicolor</i>	TR	LC	-	-	Nov. 2012
Étourneau roselin	<i>Pastor roseus</i>	TR	-	-	-	Mai. 2021
Moineau domestique	<i>Passer domesticus</i>	N	LC	-	-	
Moineau friquet	<i>Passer montanus</i>	N	EN	-	-	
Moineau soulcie	<i>Petronia petronia</i>	TR	LC	-	-	Juil. 2009
Pinson des arbres	<i>Fringilla coelebs</i>	N	LC	-	-	
Pinson du Nord	<i>Fringilla montifringilla</i>	H	-	-	-	
Serin cini	<i>Serinus serinus</i>	N	VU	-	-	
Verdier d'Europe	<i>Chloris chloris</i>	N	VU	-	-	
Chardonneret élégant	<i>Carduelis carduelis</i>	N	VU	-	-	
Tarin des aulnes	<i>Carduelis spinus</i>	H	LC	-	-	
Linotte mélodieuse	<i>Carduelis cannabina</i>	N	VU	-	-	
Sizerin flammé	<i>Carduelis flammea</i>	TR	VU	-	-	Nov. 2012
Bec-croisé des sapins	<i>Loxia curvirostra</i>	MR	LC	-	-	
Bouvreuil pivoine	<i>Pyrrhula pyrrhula</i>	N	VU	-	-	
Roselin githagine	<i>Bucanetes githagineus</i>	TR	-	-	-	
Grosbec casse-noyaux	<i>Coccothraustes coccothraustes</i>	MR	LC	-	-	
Plectrophane des neiges	<i>Plectrophenax nivalis</i>	MR	-	-	-	Nov. 2021
Bruant jaune	<i>Emberiza citrinella</i>	M	VU	-	-	
Bruant zizi	<i>Emberiza cirlus</i>	M	LC	-	-	
Bruant ortolan	<i>Emberiza hortulana</i>	MR	EN	EN	-	Avr. 2015
Bruant des roseaux	<i>Emberiza schoeniclus</i>	N	EN	-	-	
Bruant proyer	<i>Emberiza calandra</i>	M	LC	-	-	

Annexe 3 : Liste des packages R utilisés et références.

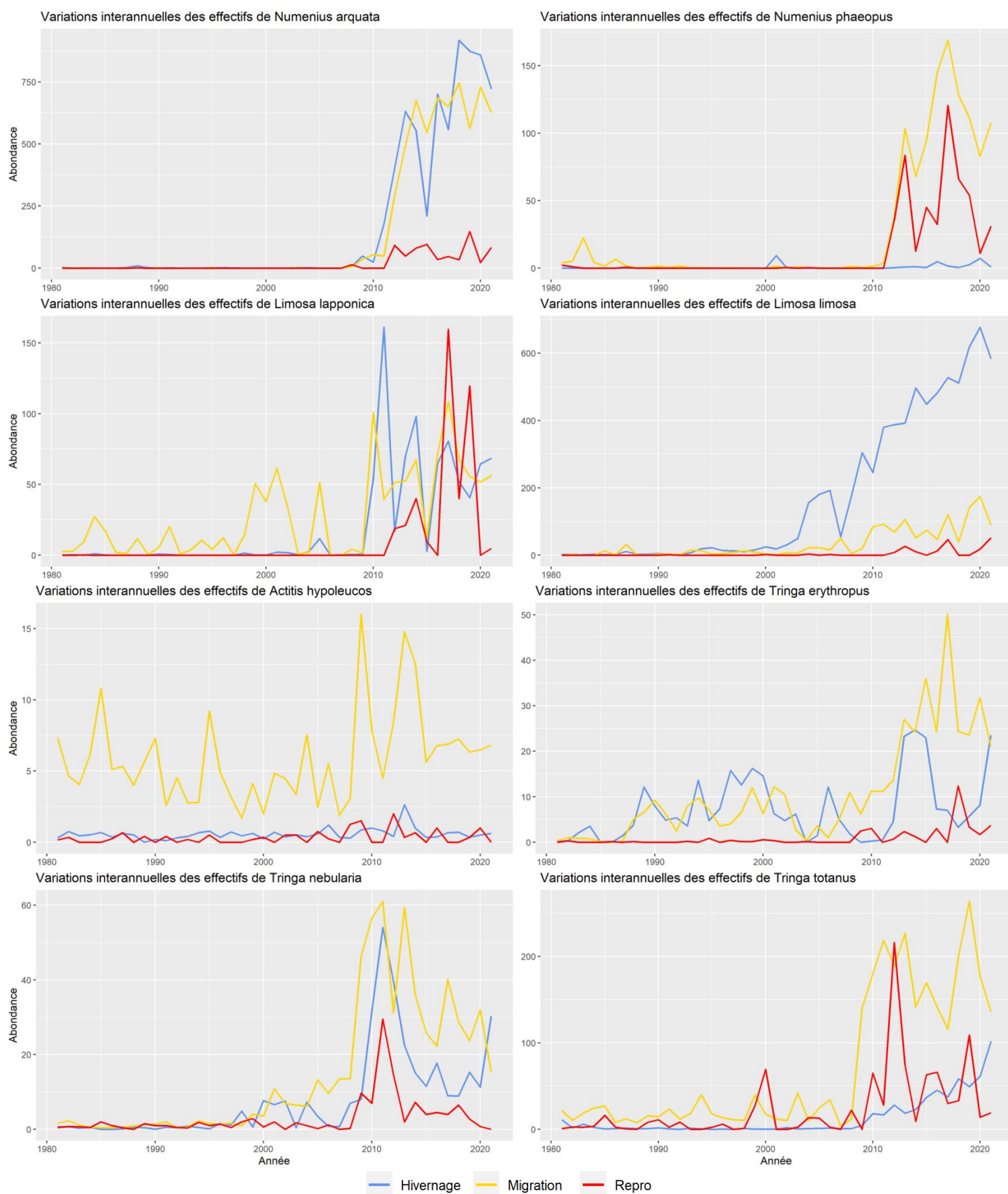
Les packages suivants sont présentés dans l'ordre alphabétique.

Nom du package	Version	Référence
abdiv	0.2.0	Bittinger K. (2020). abdiv : Alpha and Beta Diversity Measures. R package version 0.2.0. URL : https://CRAN.R-project.org/package=abdiv
car	3.0-10	Fox J. & Weisberg S. (2019). An {R} Companion to Applied Regression, Third Edition. Thousand Oaks CA: Sage. URL : https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/
cluster	2.1.3	Maechler M., Rousseeuw P., Struyf A., Hubert M., Hornik K.(2022). cluster: Cluster Analysis Basics and Extensions. R package version 2.1.3.
ClusterR	1.2.6	Mouselimis L. (2022). ClusterR : Gaussian Mixture Models, K-Means, Mini-Batch-Kmeans, K-Medoids and Affinity Propagation Clustering. R package version 1.2.6, URL : https://CRAN.R-project.org/package=ClusterR
colorspace	1.4-1	Zeileis A., Fisher J.-C., Hornik K., Ihaka R., McWhite C.-D., Murrell P., Stauffer R. & Wilke C.-O. (2019). colorspace : A Toolbox for Manipulating and Assessing Colors and Palettes. arXiv 1903.06490, arXiv.org. E-Print Archive. URL : http://arxiv.org/abs/1903.06490
devtools	2.3.2	Wickham H., Hester J. & Chang W. (2020). devtools : Tools to Make Developing R Packages Easier. R package version 2.3.2. URL : https://CRAN.R-project.org/package=devtools
dplyr	1.0.9	Wickham H., François R., Henry L. & Müller K. (2022). dplyr : A Grammar of Data Manipulation. R package version 1.0.9. URL : https://CRAN.R-project.org/package=dplyr
DT	0.16	Xie Y., Cheng J. & Tan X. (2020). DT : A Wrapper of the JavaScript Library 'DataTables'. R package version 0.16. URL : https://CRAN.R-project.org/package=DT
ecolTest	0.0.1	Salinas H. & Ramirez-Delgado D. (2021). ecolTest : Community Ecology Tests
factoextra	1.0.7	Kassambara A. & Mundt F. (2020). factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. R package version 1.0.7. URL : https://CRAN.R-project.org/package=factoextra
FactoMineR	2.4	Le S., Josse J. & Husson F. (2008). FactoMineR : An R Package for Multivariate Analysis. Journal of Statistical Software, 25(1), 1-18. DOI : 10.18637/jss.v025.i01
GGally	2.1.2	Schloerke B., Cook D., Larmarange J., Briatte F., Marbach M., Thoen E., Elberg A. & Crowley J. (2021). GGally: Extension to 'ggplot2'. R package version 2.1.2. URL : https://CRAN.R-project.org/package=GGally
ggdendro	0.1.23	de Vries A. & Ripley B. (2022). ggdendro: Create Dendrograms and Tree Diagrams Using 'ggplot2'. R package version 0.1.23. URL : https://CRAN.R-project.org/package=ggdendro
ggplot2	3.3.6	Wickham H. (2016). ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York.
lubridate	1.7.9	Grolemund G. & Wickham H. (2011). Dates and Times Made Easy with lubridate. Journal of Statistical Software, 40(3), 1-25. URL : http://www.jstatsoft.org/v40/i03/
multcomp	1.4-18	Hothorn T., Bretz F. & Westfall P. (2008). Simultaneous Inference in General Parametric Models. Biometrical Journal 50(3), 346--363.
plyr	1.8.6	Wickham H. (2011). The Split-Apply-Combine Strategy for Data Analysis. Journal of Statistical Software, 40(1), 1-29. URL : http://www.jstatsoft.org/v40/i01/
readr	2.1.2	Wickham H., Hester J. & Bryan J. (2022). readr: Read Rectangular Text Data. R package version 2.1.2. https://CRAN.R-project.org/package=readr
sf	0.9-6	Pebesma E. (2018). Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. The R Journal 10 (1), 439-446, DOI : https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009
stringr	1.4.0	Wickham H. (2019). stringr: Simple, Consistent Wrappers for Common String Operations. R package version 1.4.0. URL : https://CRAN.R-project.org/package=stringr
tidyr	1.2.0	Wickham H. & Girlich M. (2022). tidyr: Tidy Messy Data. R package version 1.2.0. URL : https://CRAN.R-project.org/package=tidyr
vegan	2.5-7	Oksanen J., Blanchet G., Friendly M., Kindt R., Legendre P., McGlinn D., Minchin P., O'Hara R.B., Simpson G., Solymos P., Stevens M.H.H., Szoecs E. & Wagner H. (2020). vegan : Community Ecology Package. R package version 2.5-7. URL : https://CRAN.R-project.org/package=vegan

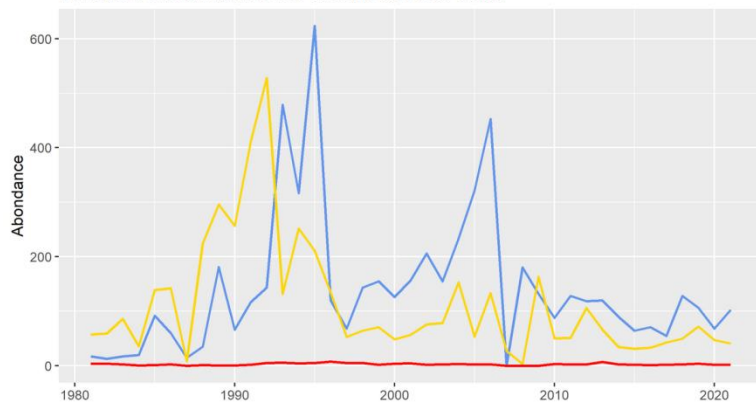
Annexe 4 : Détail des classes définies lors de la stratification.

Champ	Classe	Correspondance
MAREE	MAR1	± 1h autour de la marée haute
	MAR2	Entre ± 1h et ± 2h autour de la marée haute
	MAR3	Entre ± 2h et ± 4h autour de la marée haute
	MAR4	± 2h autour de la marée basse
COEFF	C1	Coefficient > 95
	C2	Coefficient entre 80 et 95
	C3	Coefficient entre 60 et 79
	C4	Coefficient < 60
COUV	0	Couverture nuageuse < 25 %
	1	Couverture nuageuse entre 25 et 75 %
	2	Couverture nuageuse > 75 %
PRECIP	0	Pas de pluie
	1	Pluie fine
	2	Pluie modérée & averses
	3	Forte pluie
VENT	0	Pas de vent
	1	Vent faible
	2	Vent modéré
	3	Vent fort
	4	Vent violent
DEMIJOURNEE	AM	Matin
	PM	Après-midi

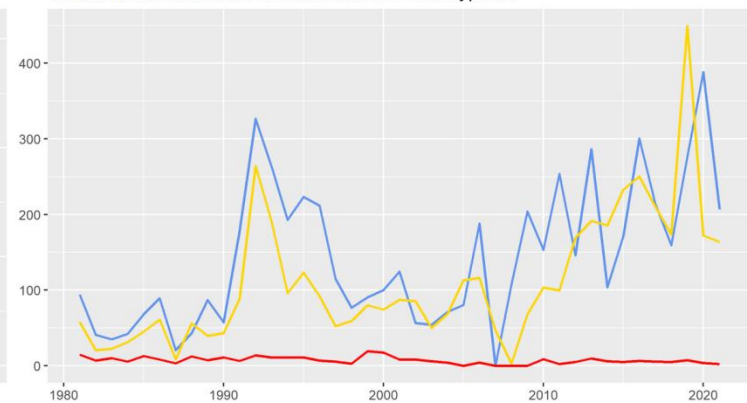
Annexe 5 : Variations interannuelles des effectifs des espèces patrimoniales.



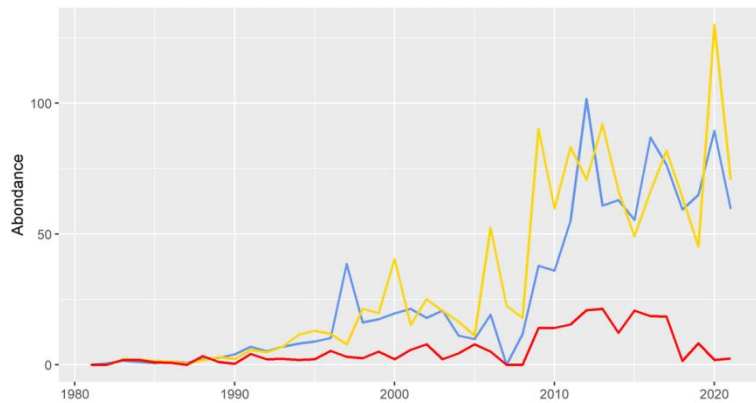
Variations interannuelles des effectifs de *Anas acuta*



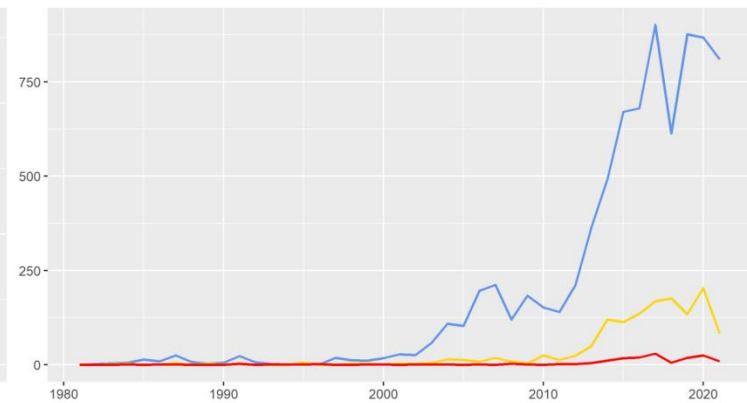
Variations interannuelles des effectifs de *Anas clypeata*



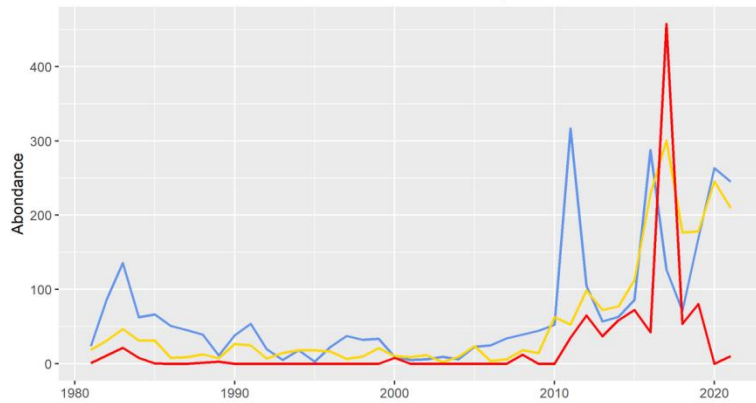
Variations interannuelles des effectifs de *Platalea leucorodia*



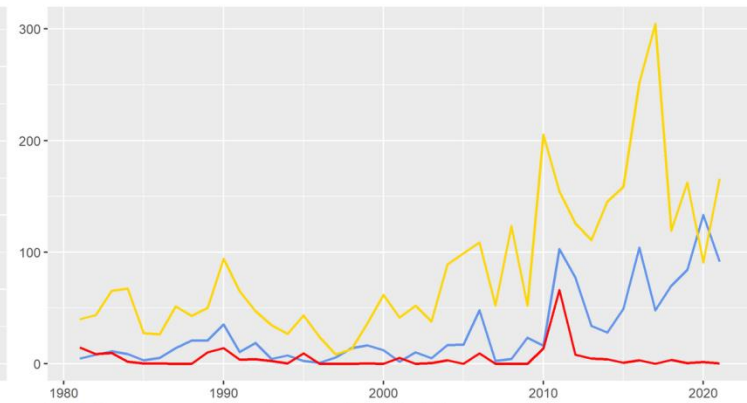
Variations interannuelles des effectifs de *Recurvirostra avosetta*



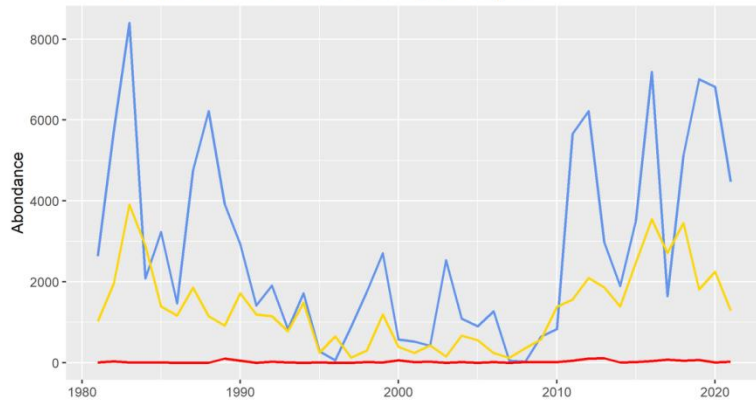
Variations interannuelles des effectifs de *Pluvialis squatarola*



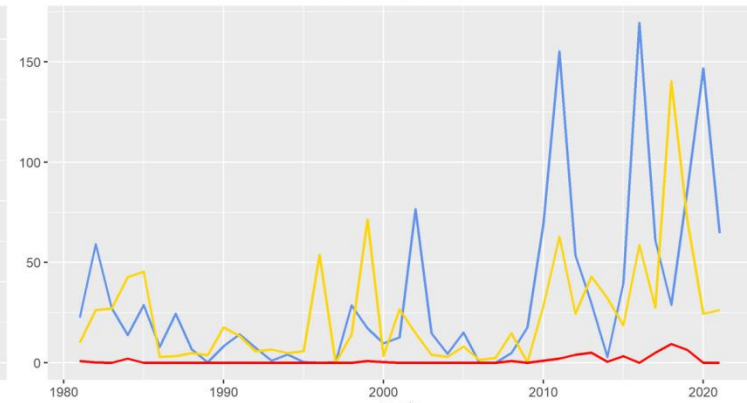
Variations interannuelles des effectifs de *Charadrius hiaticula*



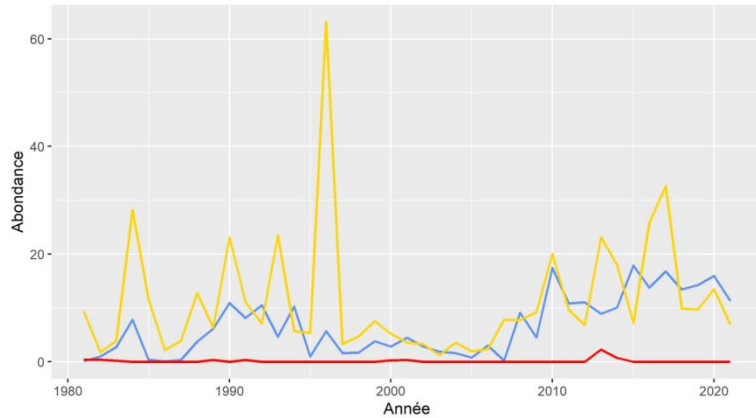
Variations interannuelles des effectifs de *Calidris alpina*



Variations interannuelles des effectifs de *Calidris canutus*



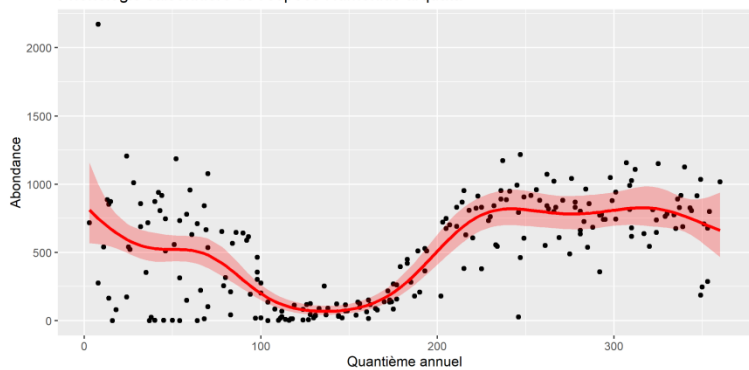
Variations interannuelles des effectifs de *Calidris minuta*



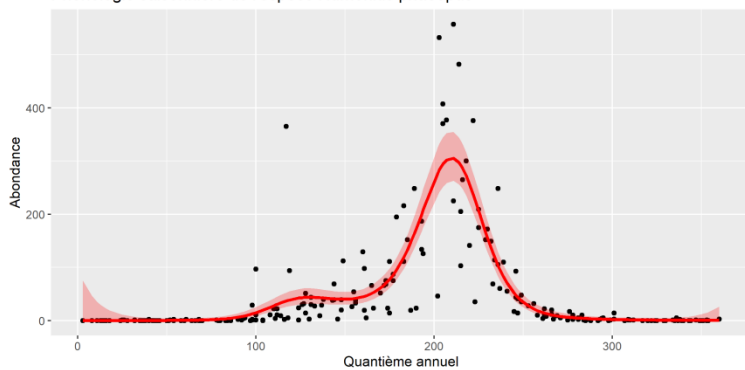
— Hivernage — Migration — Repro

Annexe 6 : Phénologie annuelle des espèces patrimoniales.

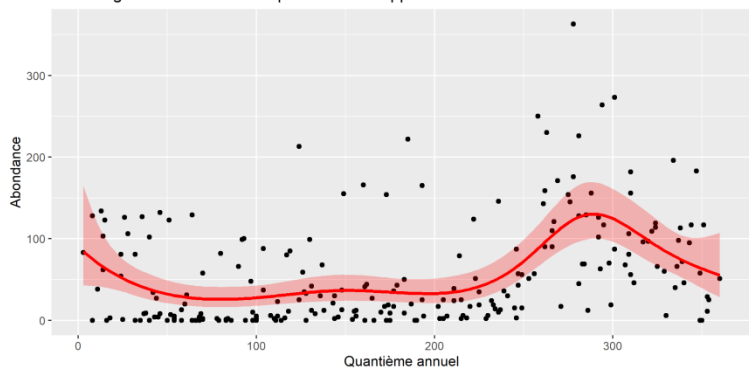
Phénologie saisonnière de l'espèce *Numenius arquata*



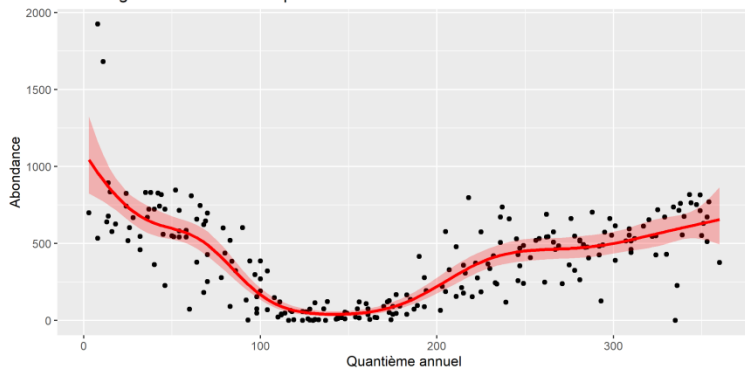
Phénologie saisonnière de l'espèce *Numenius phaeopus*



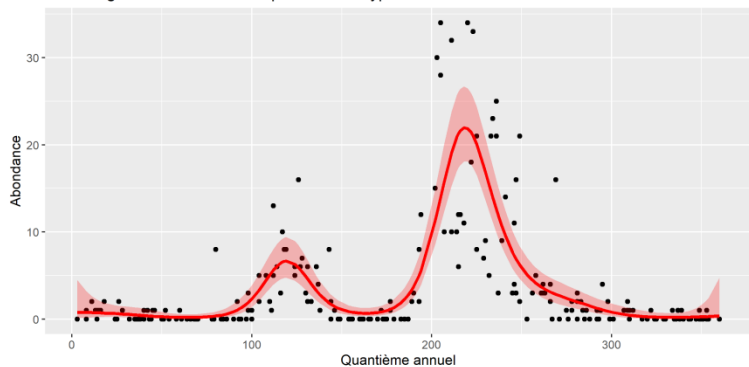
Phénologie saisonnière de l'espèce *Limosa lapponica*



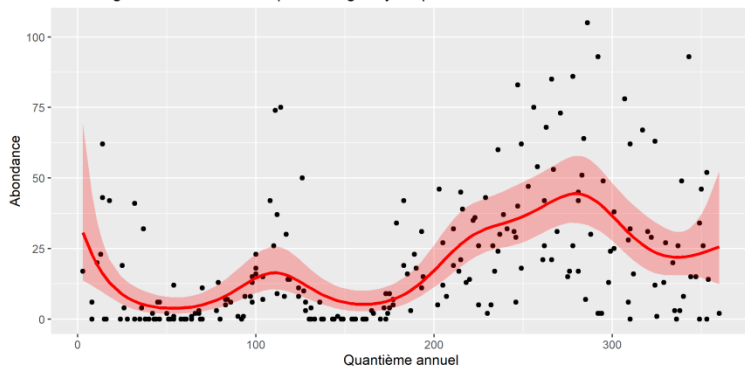
Phénologie saisonnière de l'espèce *Limosa limosa*



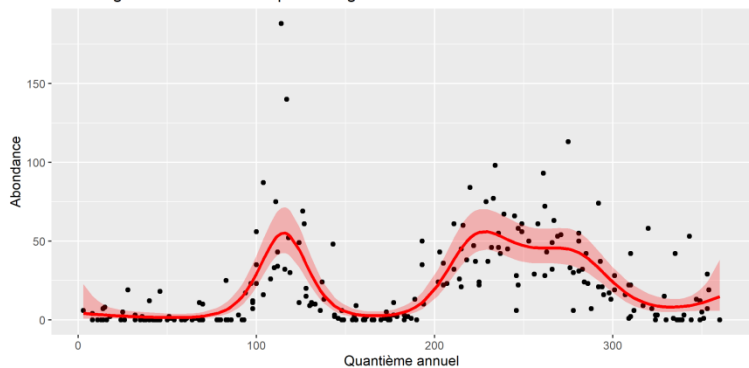
Phénologie saisonnière de l'espèce *Actitis hypoleucos*



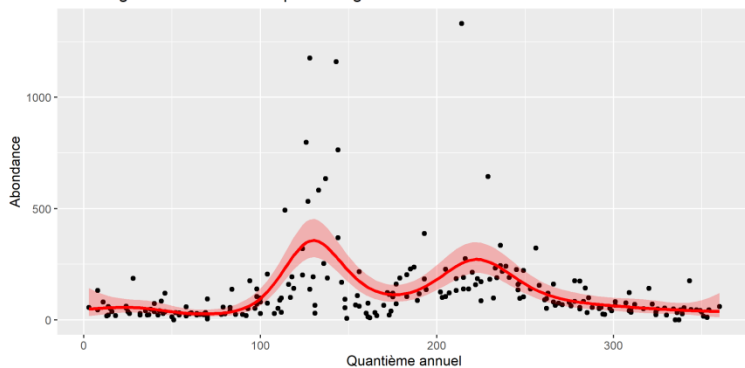
Phénologie saisonnière de l'espèce *Tringa erythropus*



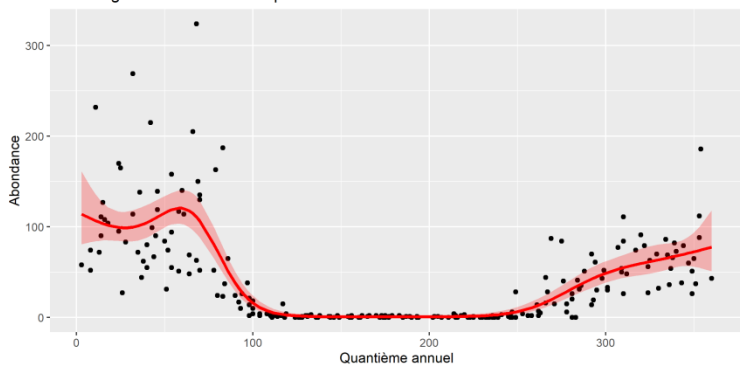
Phénologie saisonnière de l'espèce *Tringa nebularia*



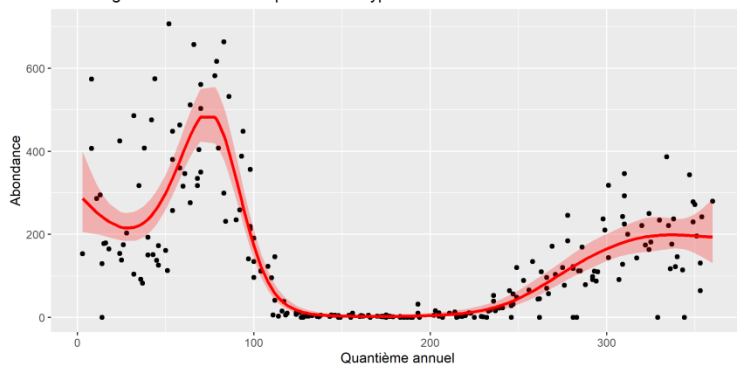
Phénologie saisonnière de l'espèce *Tringa totanus*



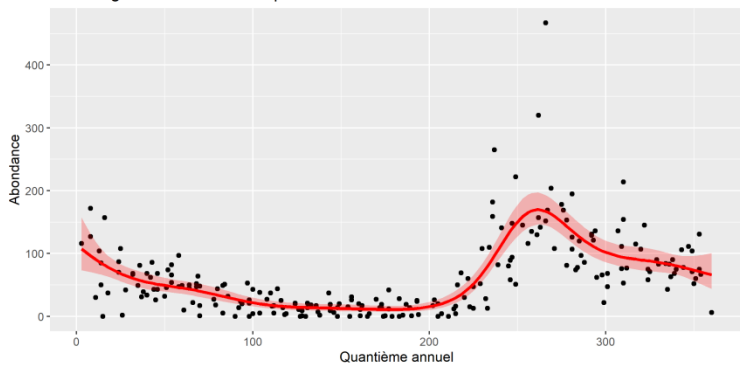
Phénologie saisonnière de l'espèce *Anas acuta*



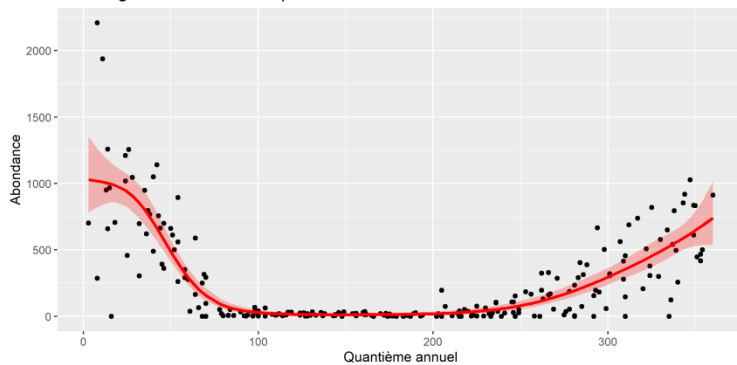
Phénologie saisonnière de l'espèce *Anas clypeata*



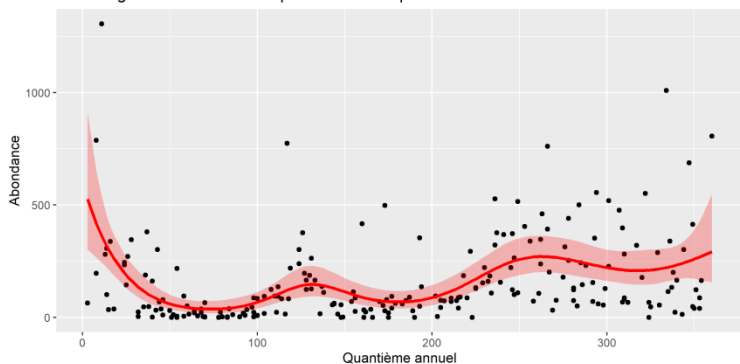
Phénologie saisonnière de l'espèce *Platalea leucorodia*



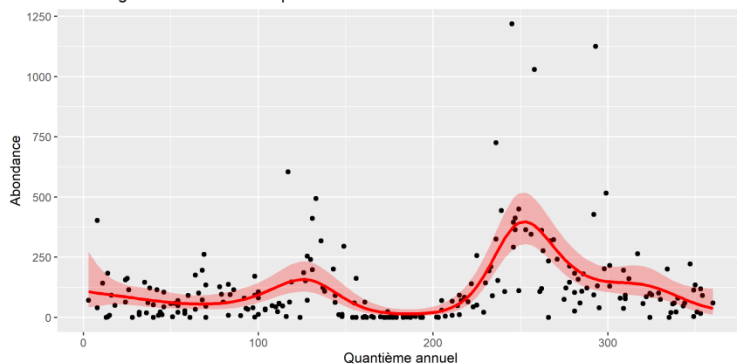
Phénologie saisonnière de l'espèce *Recurvirostra avosetta*



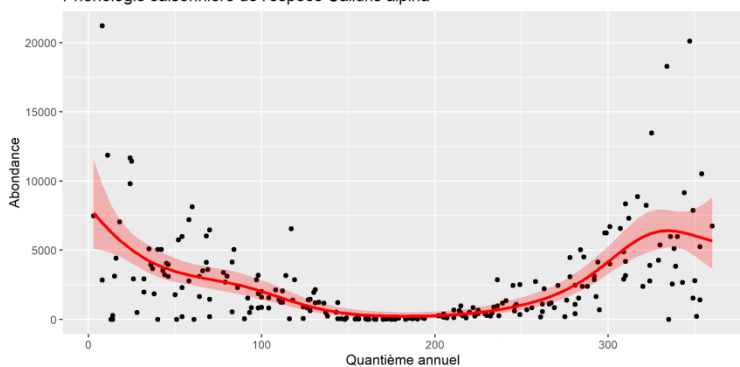
Phénologie saisonnière de l'espèce *Pluvialis squatarola*



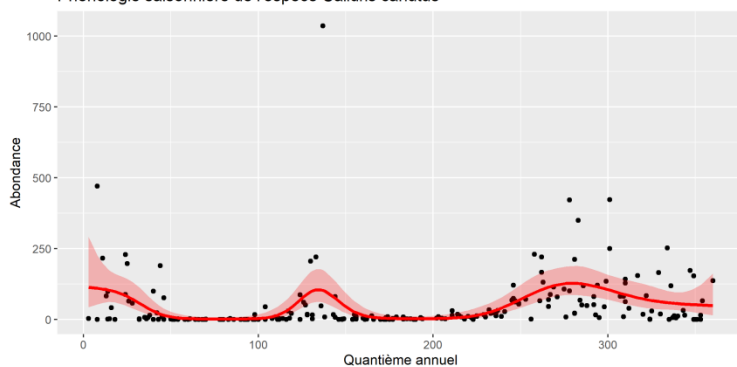
Phénologie saisonnière de l'espèce *Charadrius hiaticula*



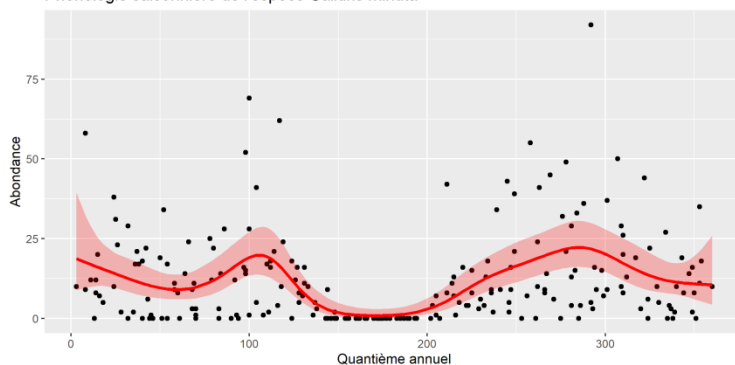
Phénologie saisonnière de l'espèce *Calidris alpina*



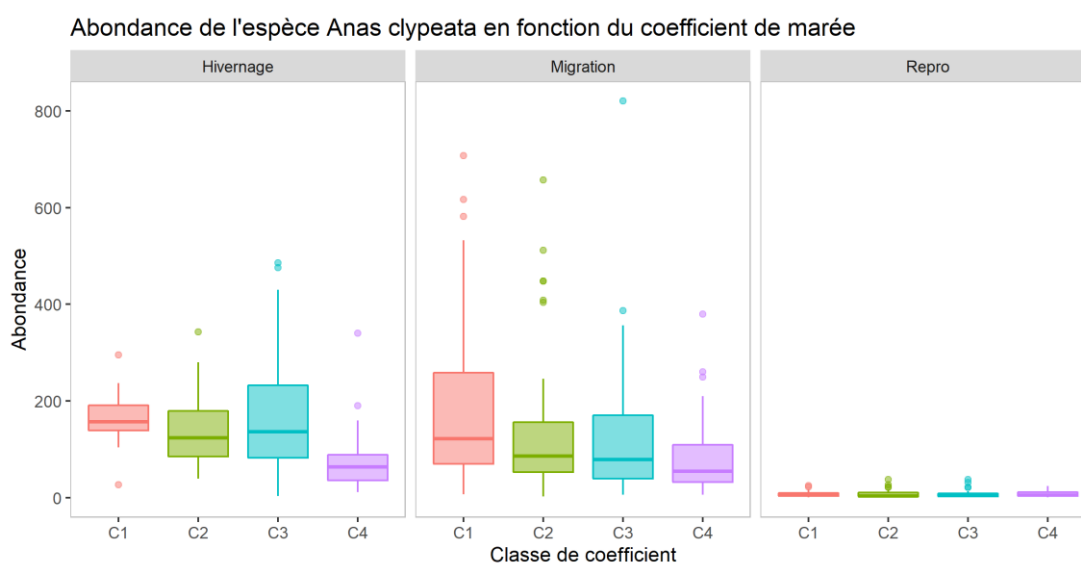
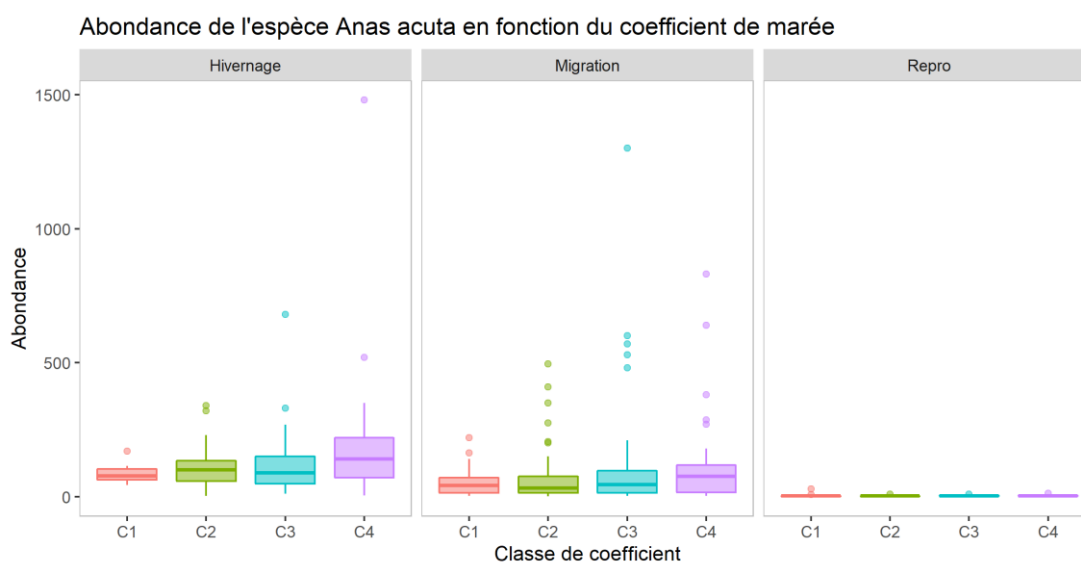
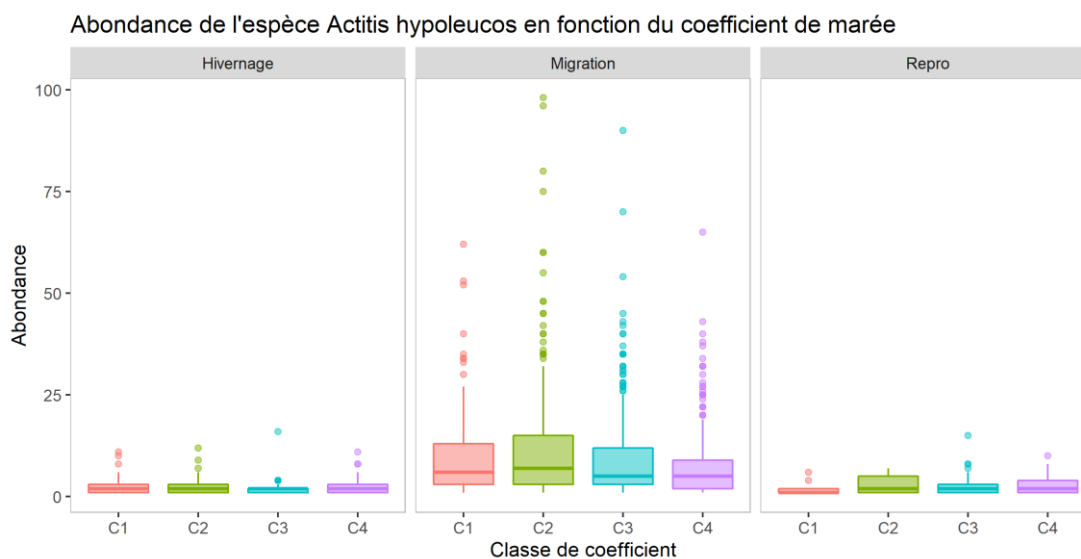
Phénologie saisonnière de l'espèce *Calidris canutus*



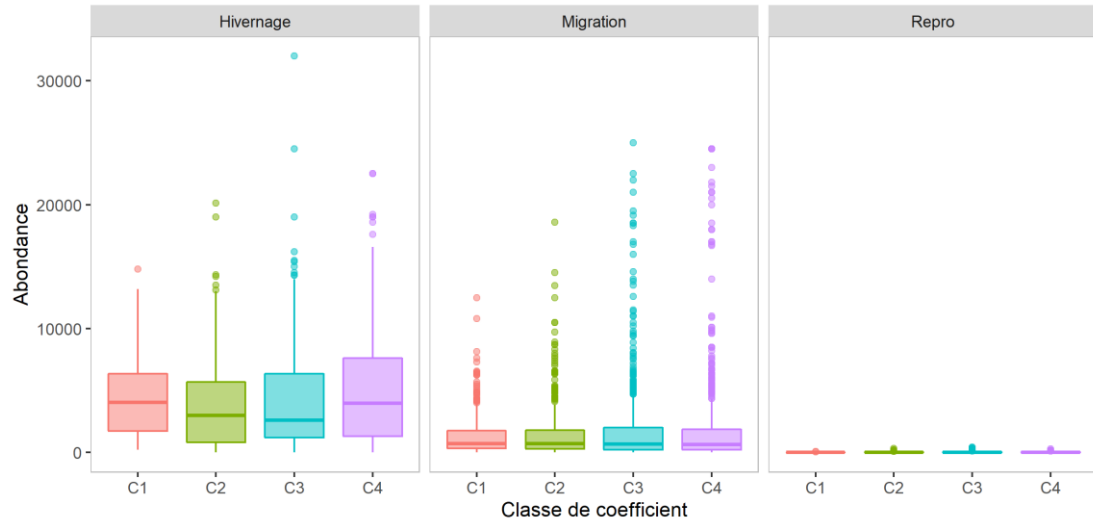
Phénologie saisonnière de l'espèce *Calidris minuta*



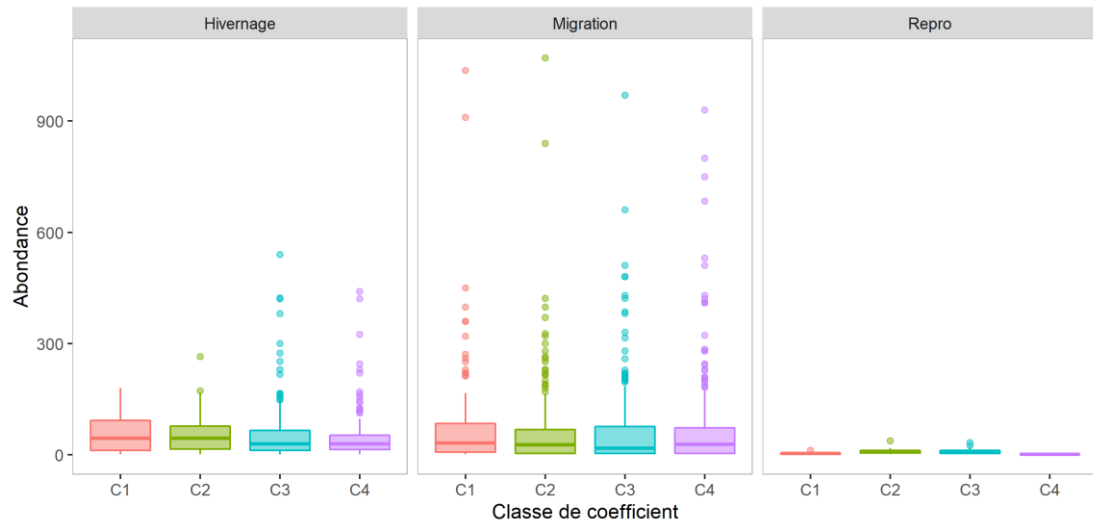
Annexe 7 : Influence du coefficient de marée sur l'abondance des espèces patrimoniales.



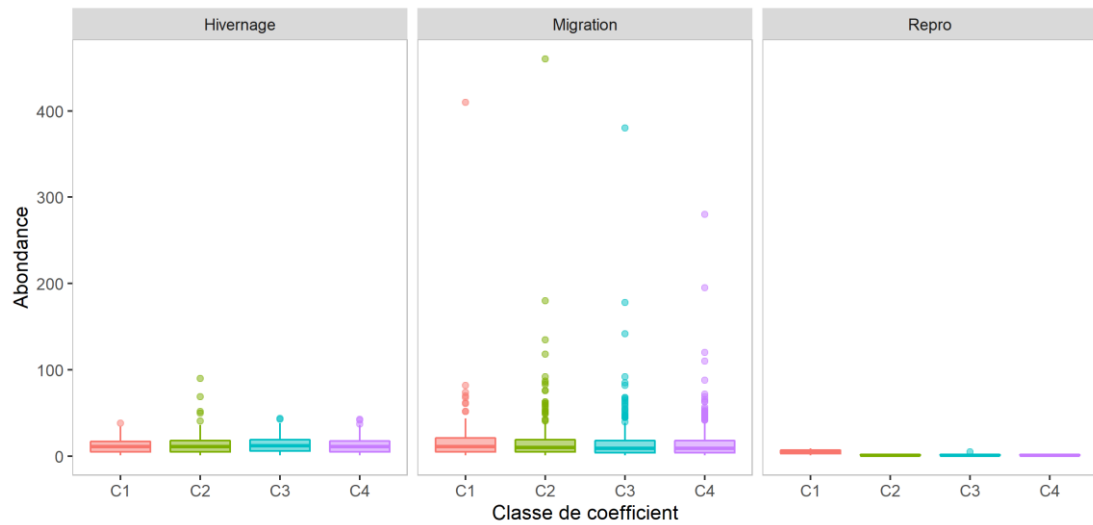
Abondance de l'espèce *Calidris alpina* en fonction du coefficient de marée



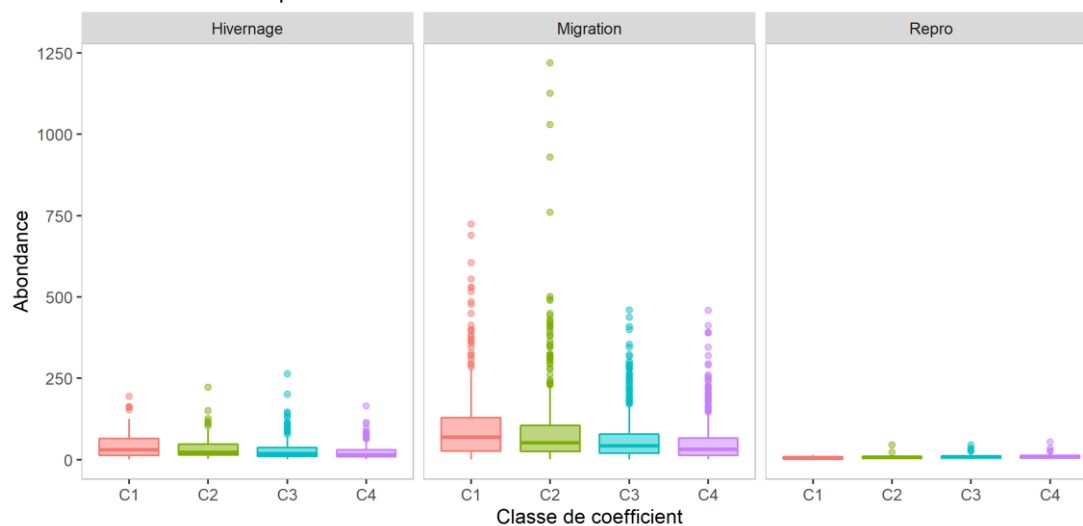
Abondance de l'espèce *Calidris canutus* en fonction du coefficient de marée



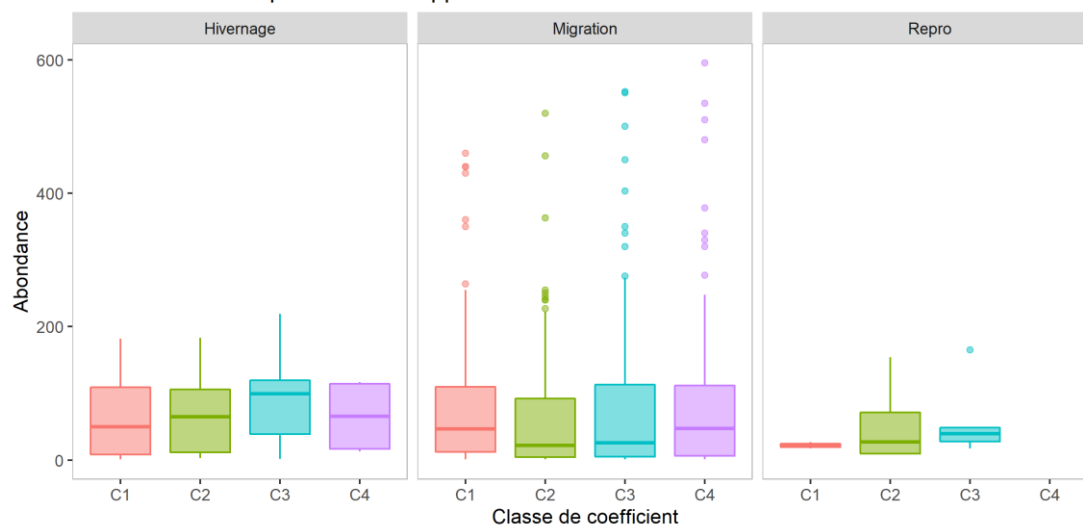
Abondance de l'espèce *Calidris minuta* en fonction du coefficient de marée



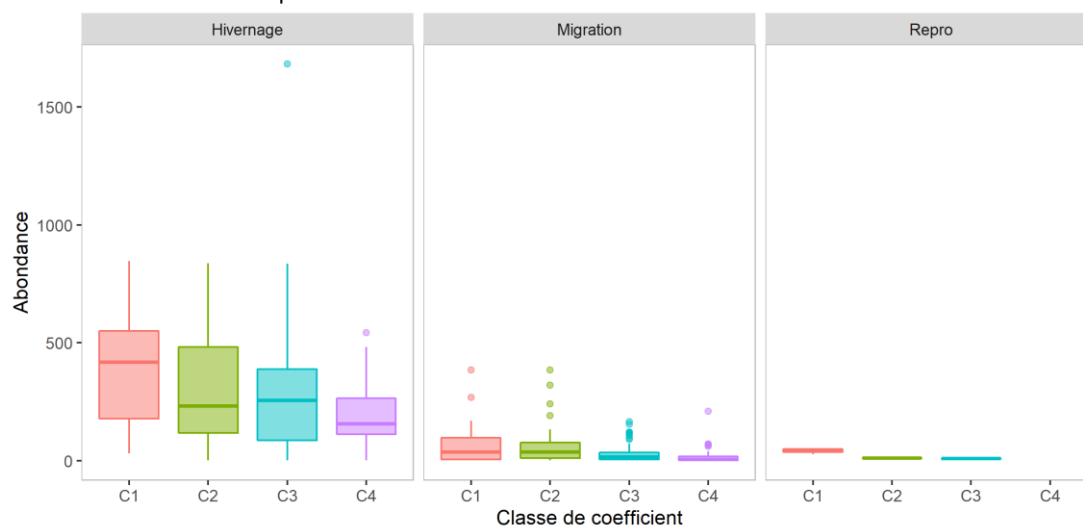
Abondance de l'espèce *Charadrius hiaticula* en fonction du coefficient de marée



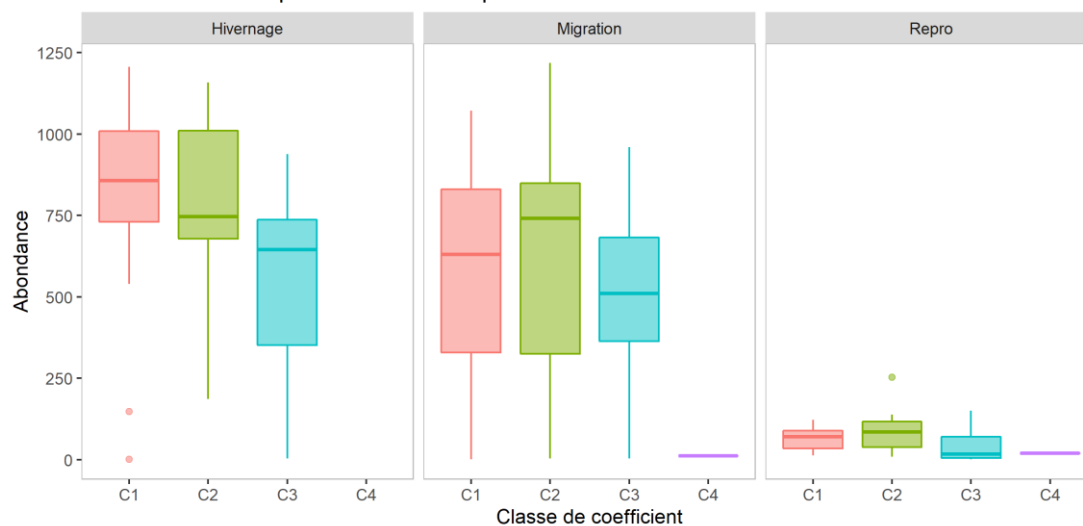
Abondance de l'espèce *Limosa lapponica* en fonction du coefficient de marée



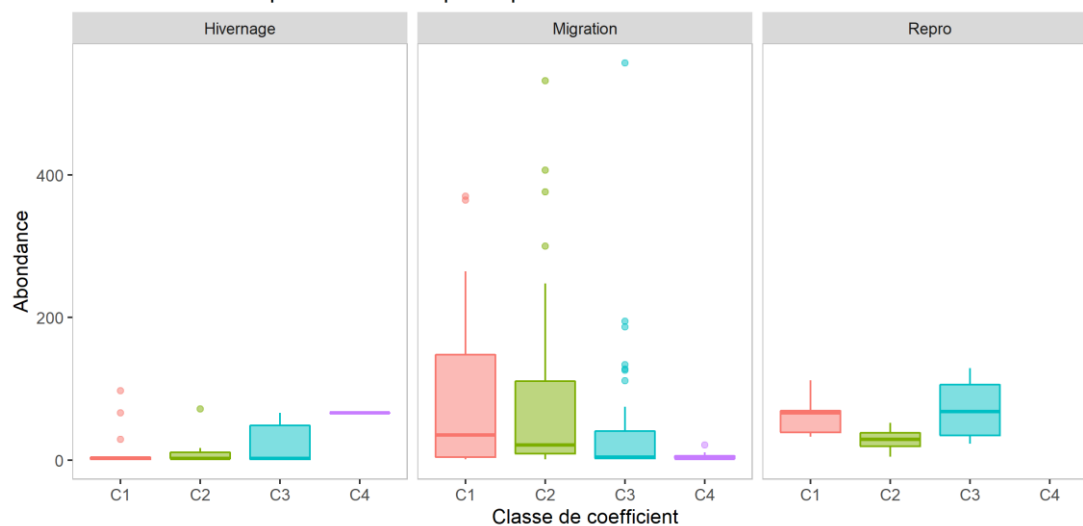
Abondance de l'espèce *Limosa limosa* en fonction du coefficient de marée



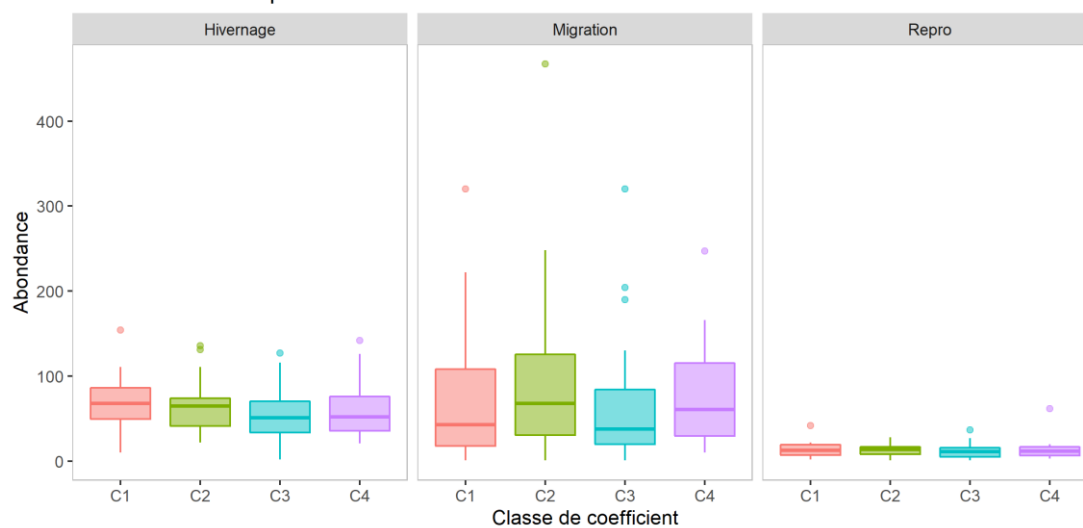
Abondance de l'espèce *Numenius arquata* en fonction du coefficient de marée



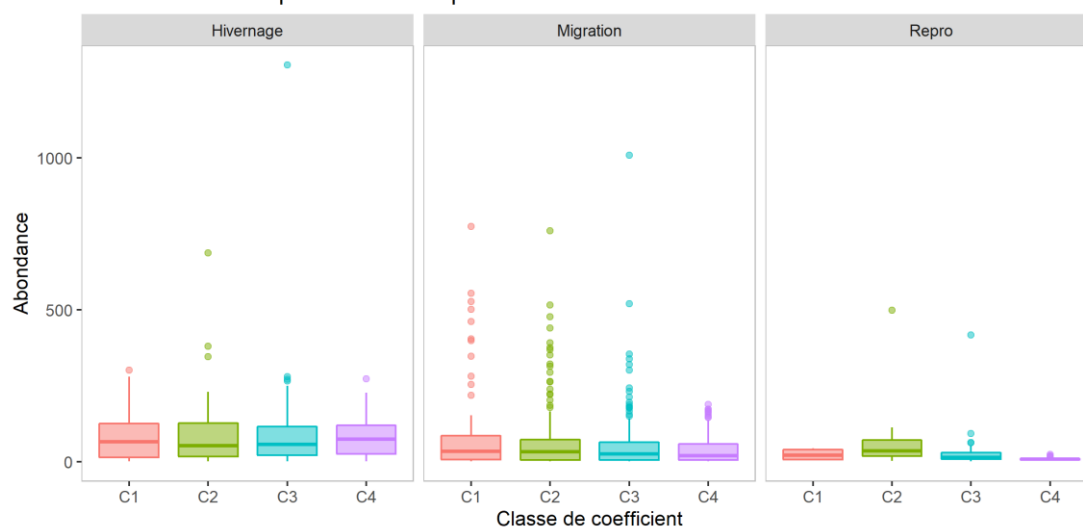
Abondance de l'espèce *Numenius phaeopus* en fonction du coefficient de marée



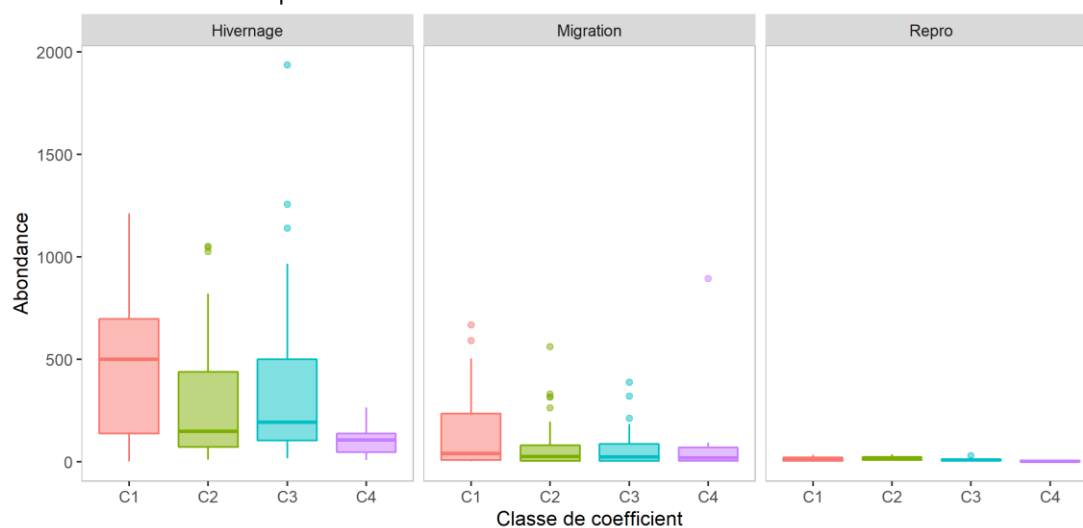
Abondance de l'espèce *Platalea leucorodia* en fonction du coefficient de marée



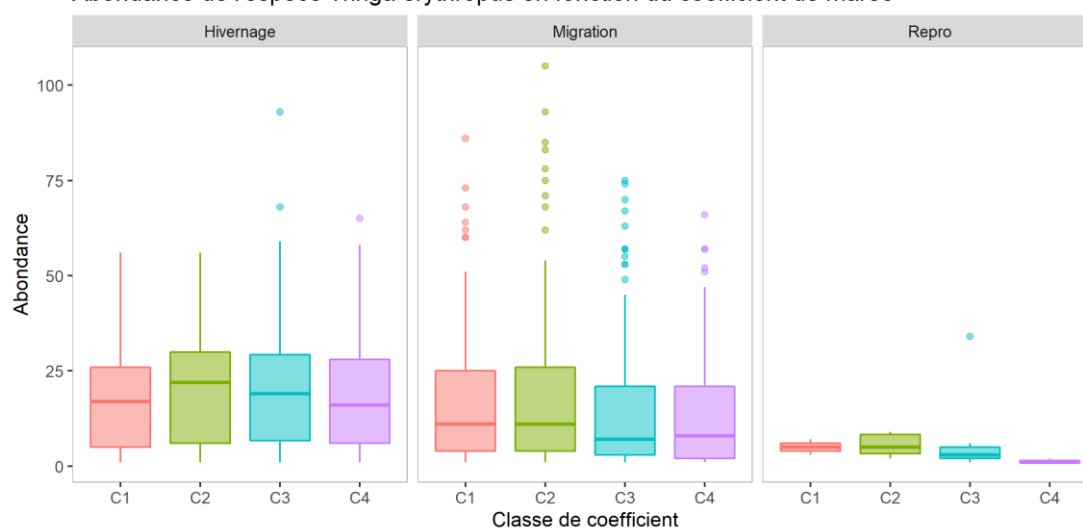
Abondance de l'espèce *Pluvialis squatarola* en fonction du coefficient de marée



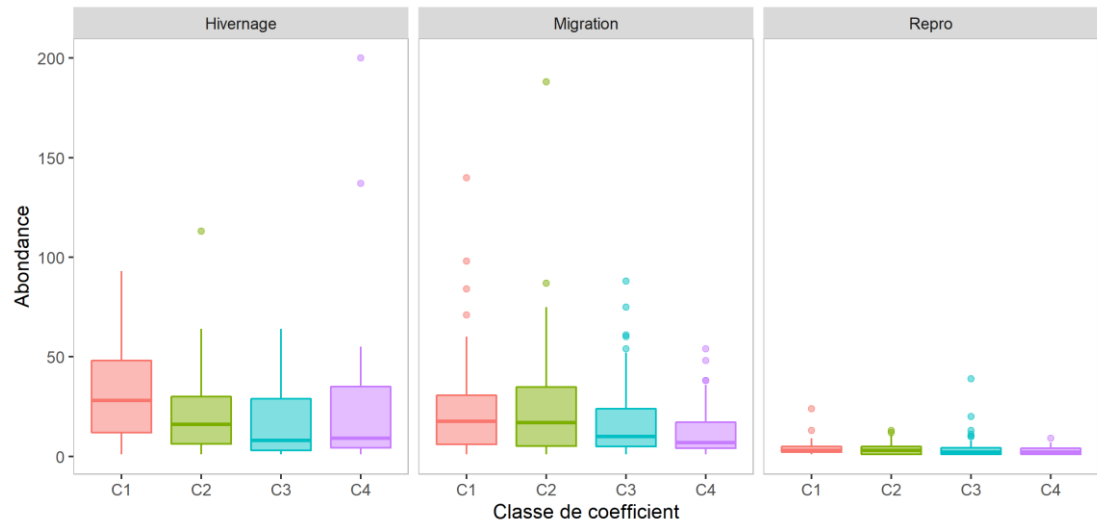
Abondance de l'espèce *Recurvirostra avosetta* en fonction du coefficient de marée



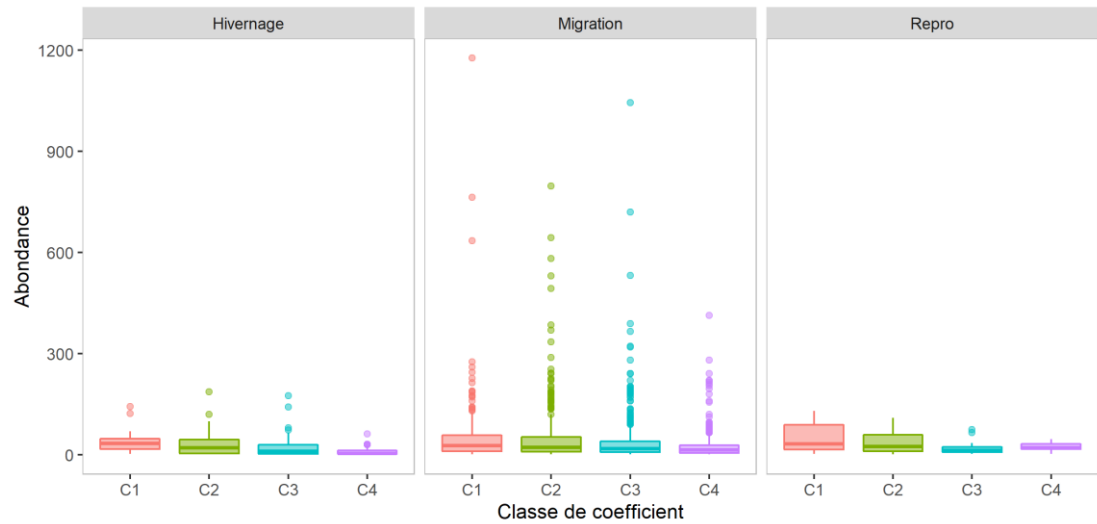
Abondance de l'espèce *Tringa erythropus* en fonction du coefficient de marée



Abondance de l'espèce *Tringa nebularia* en fonction du coefficient de marée

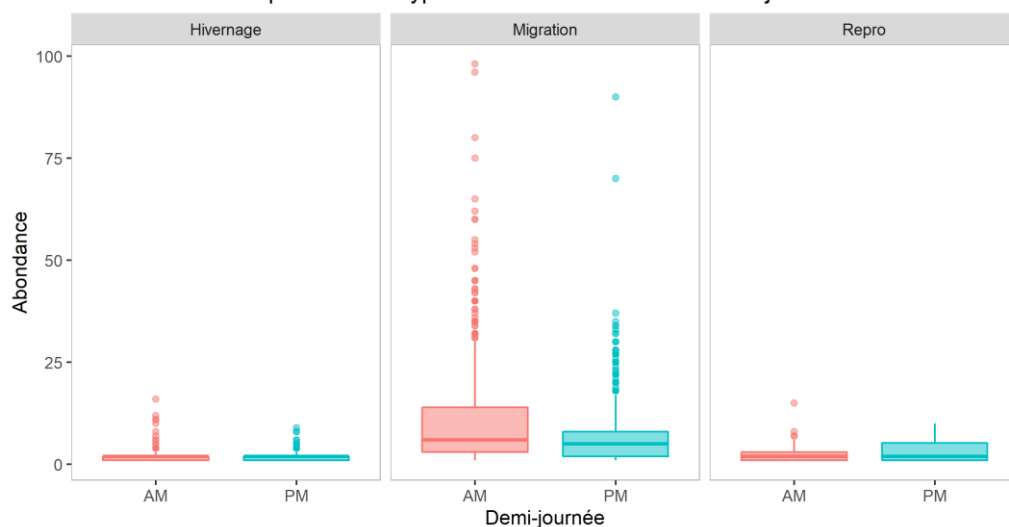


Abondance de l'espèce *Tringa totanus* en fonction du coefficient de marée

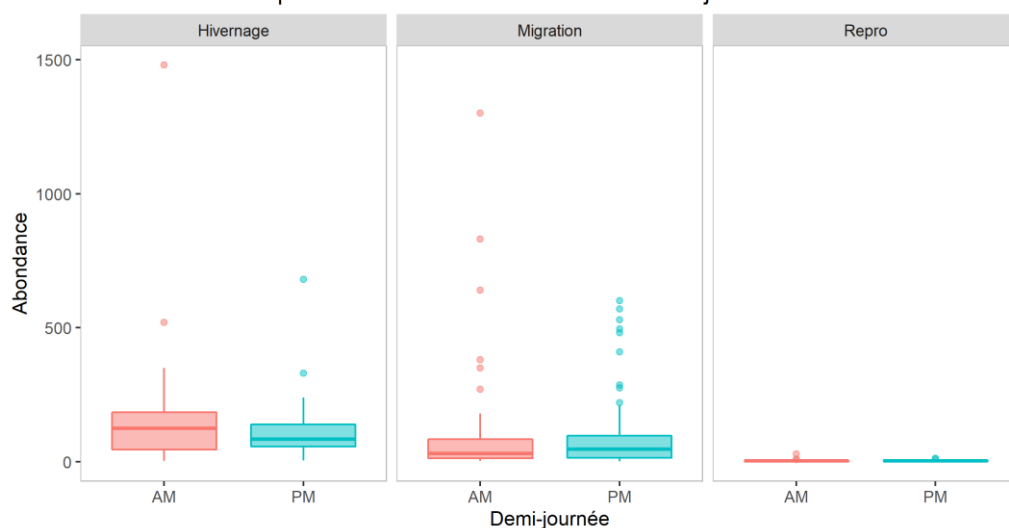


Annexe 8 : Influence de la demi-journée sur l'abondance des espèces patrimoniales.

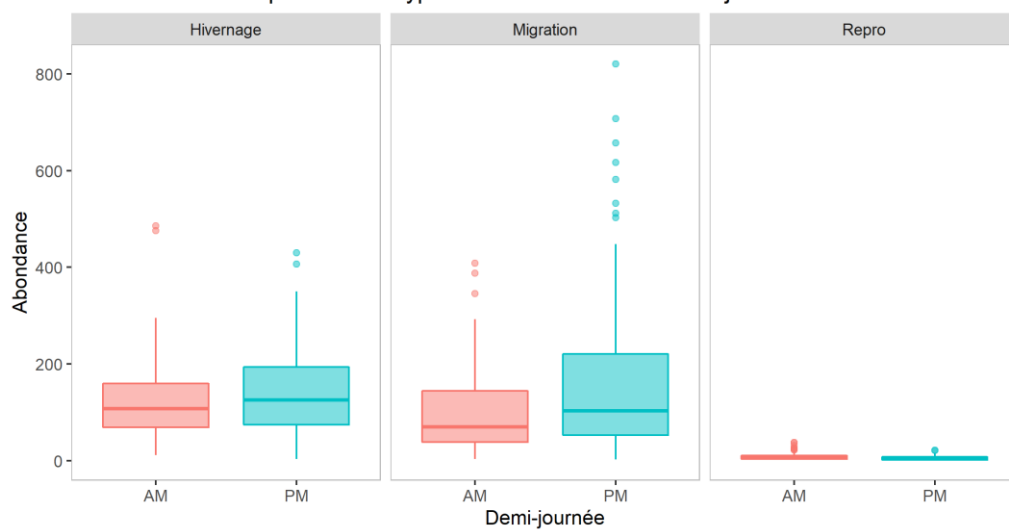
Abondance de l'espèce *Actitis hypoleucos* en fonction de la demi-journée



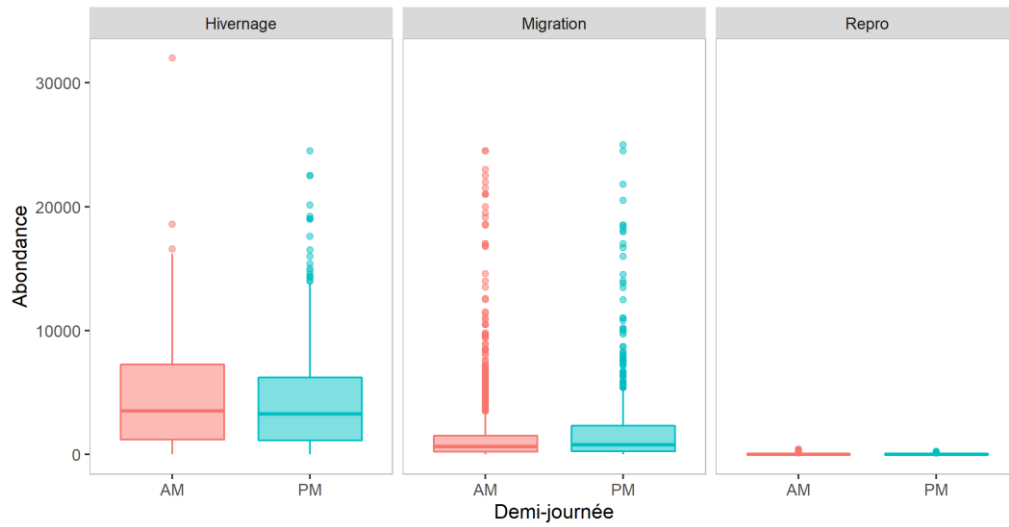
Abondance de l'espèce *Anas acuta* en fonction de la demi-journée



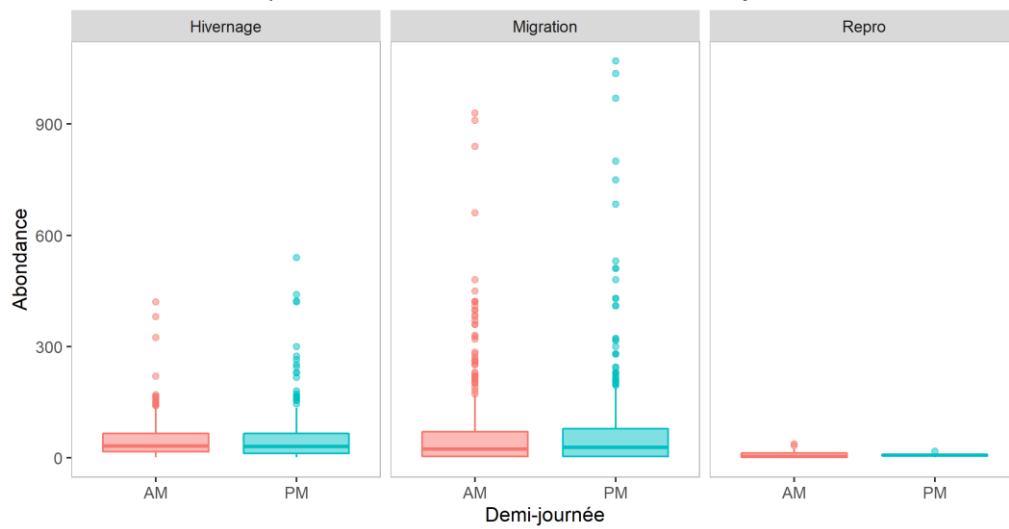
Abondance de l'espèce *Anas clypeata* en fonction de la demi-journée



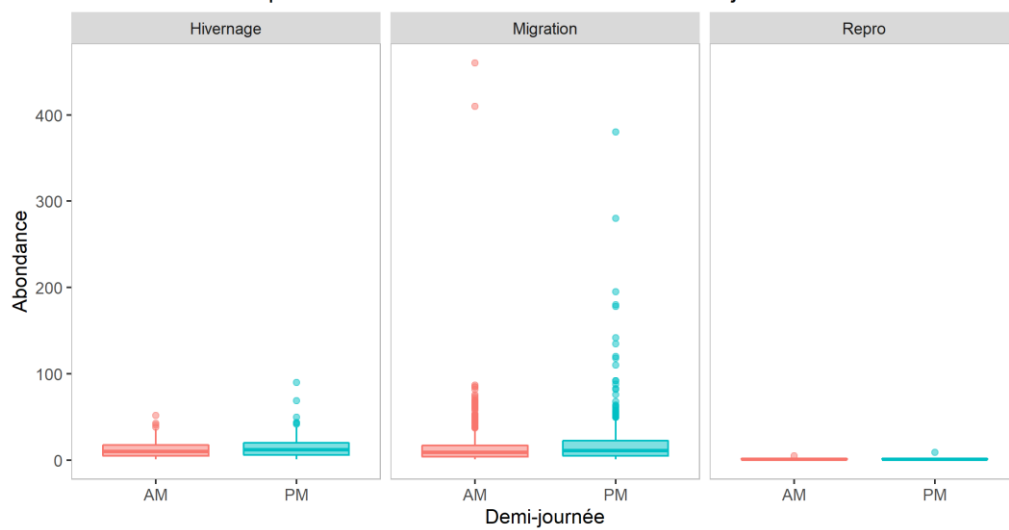
Abondance de l'espèce *Calidris alpina* en fonction de la demi-journée



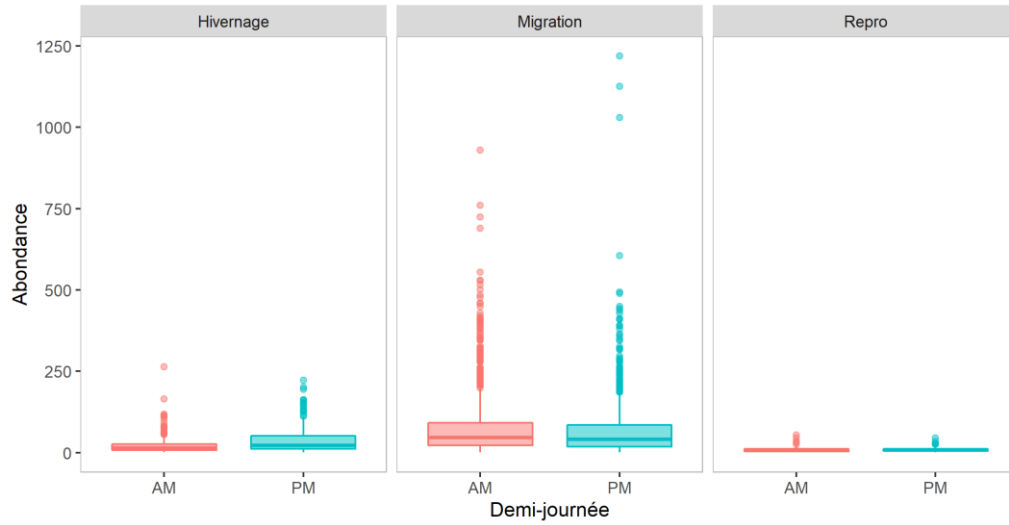
Abondance de l'espèce *Calidris canutus* en fonction de la demi-journée



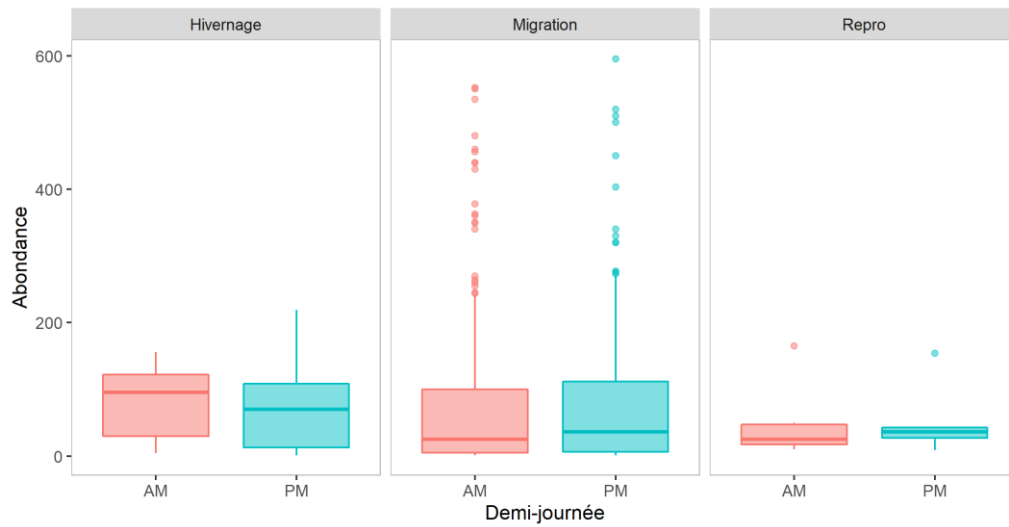
Abondance de l'espèce *Calidris minuta* en fonction de la demi-journée



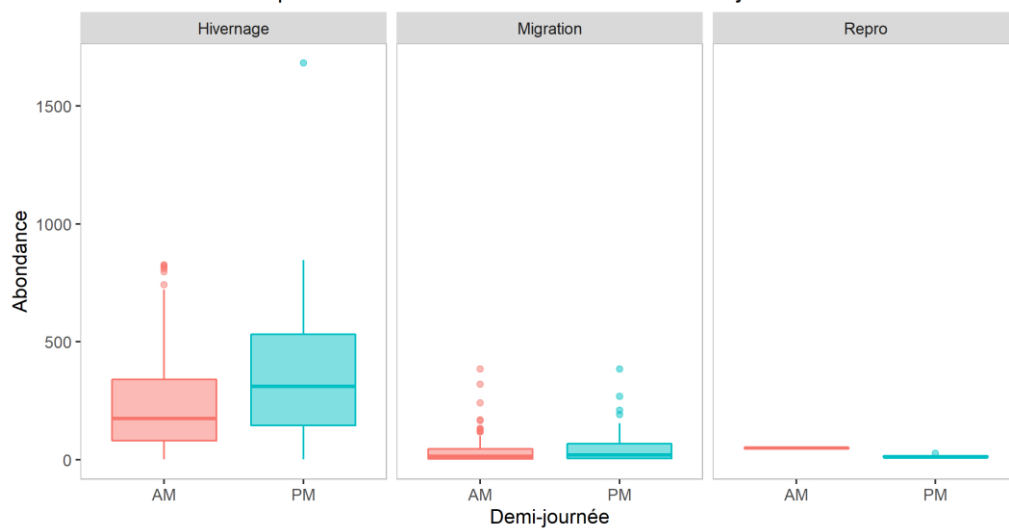
Abondance de l'espèce *Charadrius hiaticula* en fonction de la demi-journée



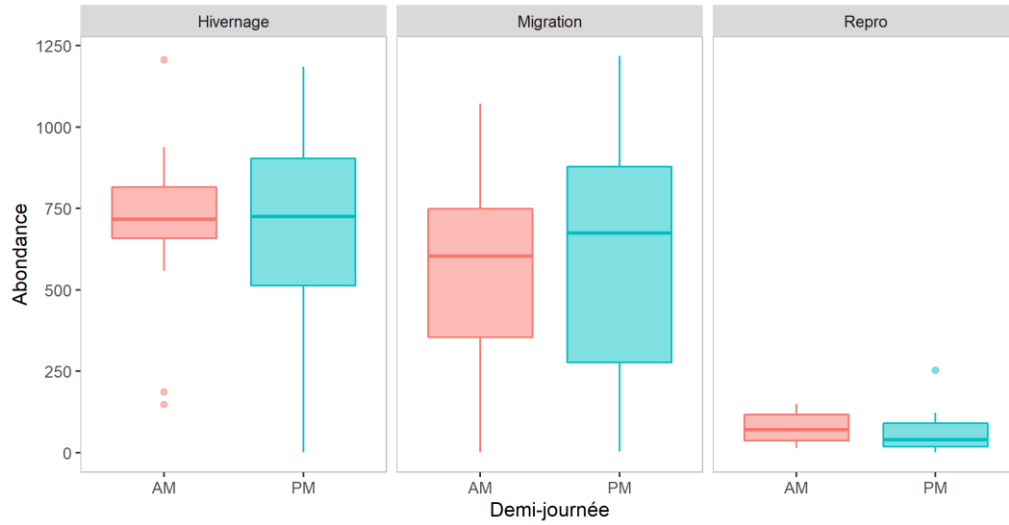
Abondance de l'espèce *Limosa lapponica* en fonction de la demi-journée



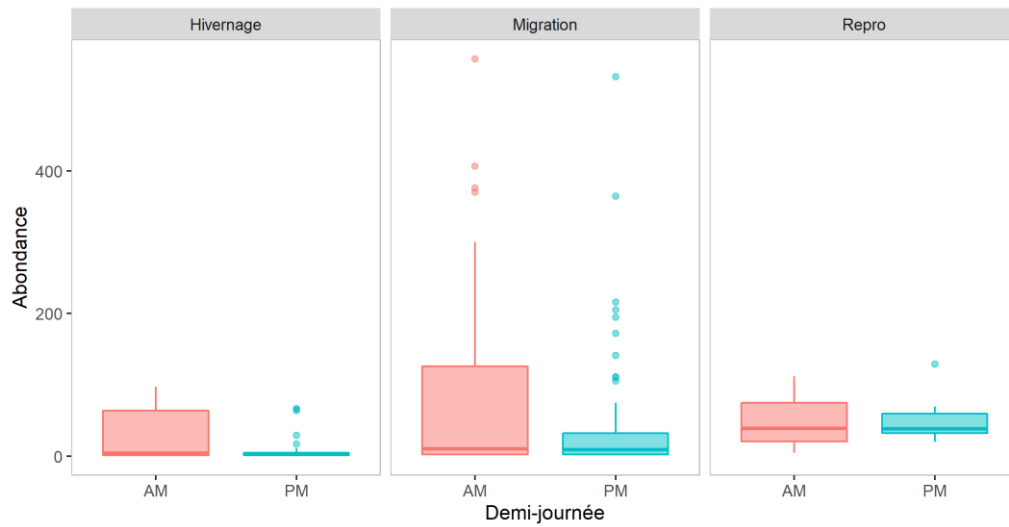
Abondance de l'espèce *Limosa limosa* en fonction de la demi-journée



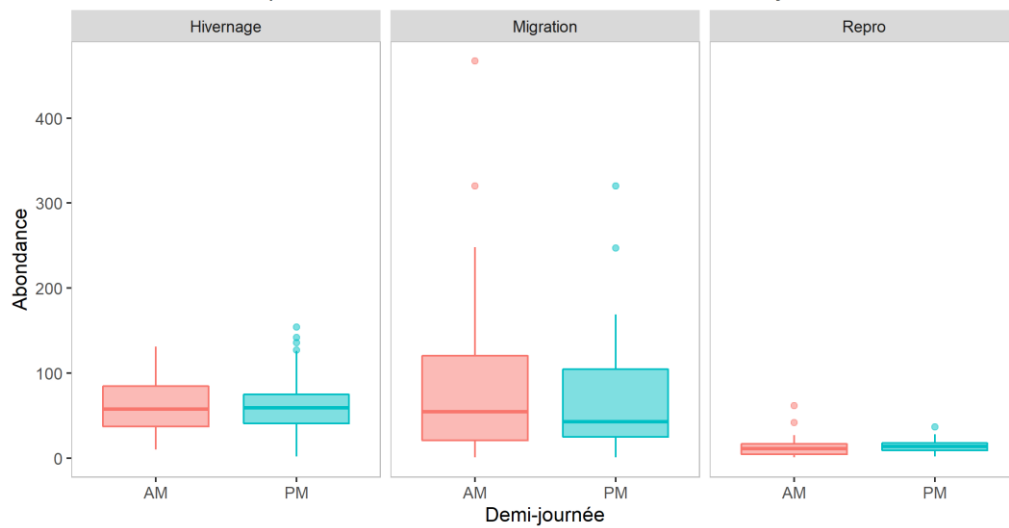
Abondance de l'espèce *Numenius arquata* en fonction de la demi-journée



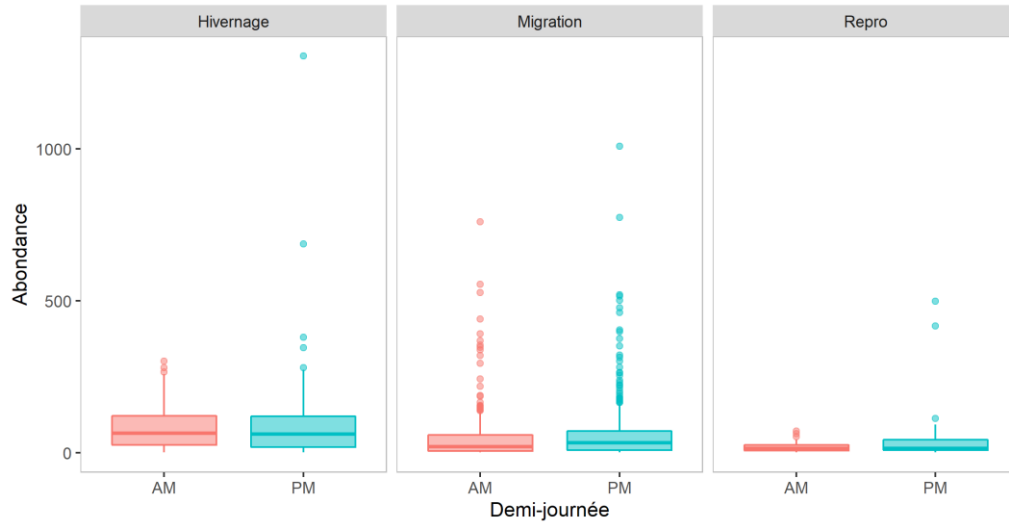
Abondance de l'espèce *Numenius phaeopus* en fonction de la demi-journée



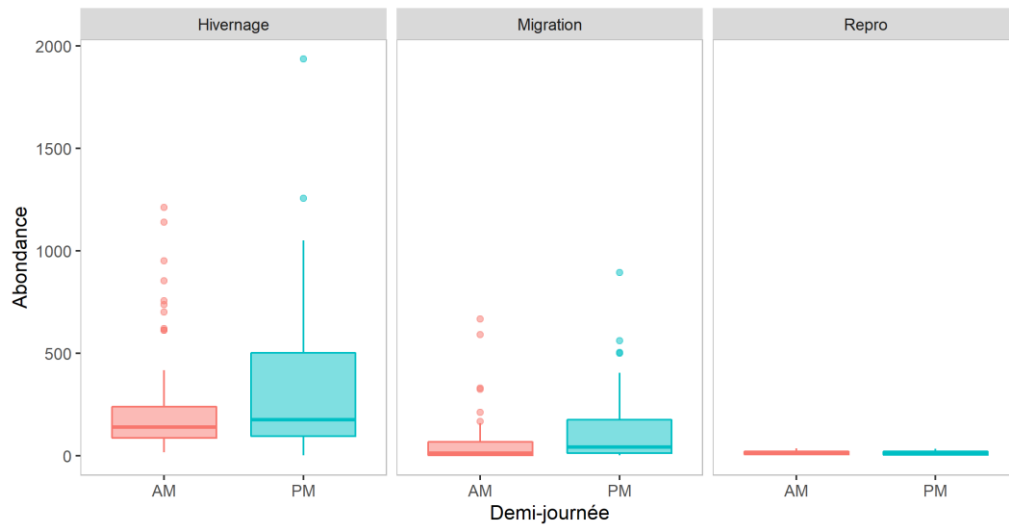
Abondance de l'espèce *Platalea leucorodia* en fonction de la demi-journée



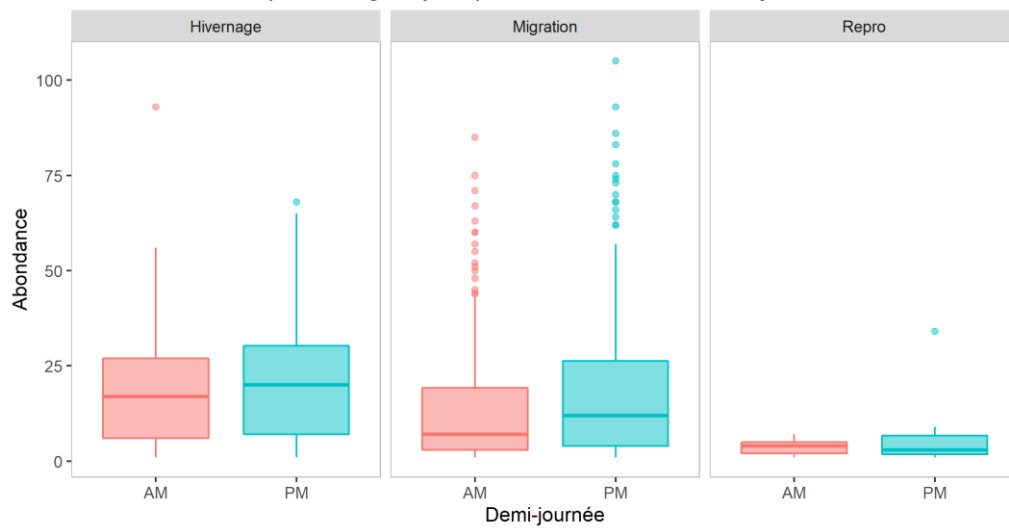
Abondance de l'espèce *Pluvialis squatarola* en fonction de la demi-journée



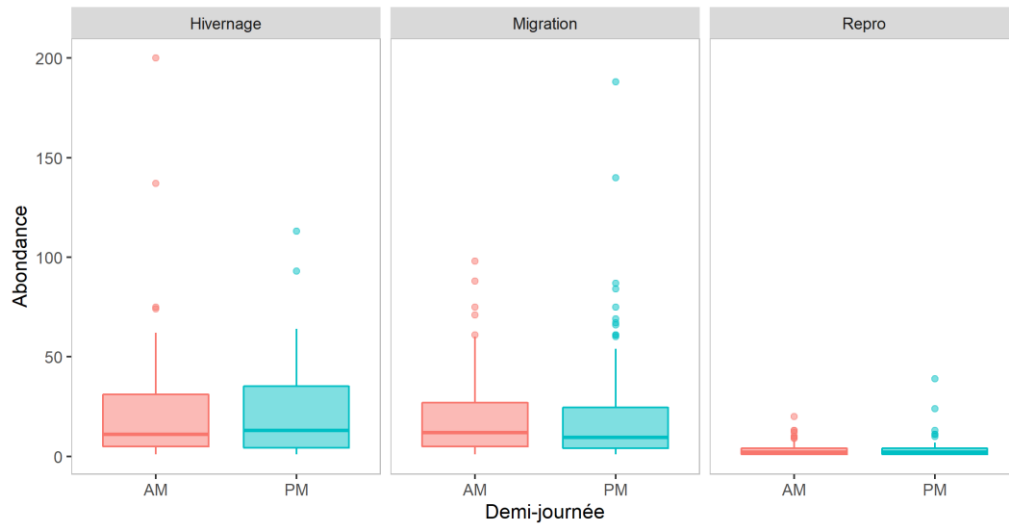
Abondance de l'espèce *Recurvirostra avosetta* en fonction de la demi-journée



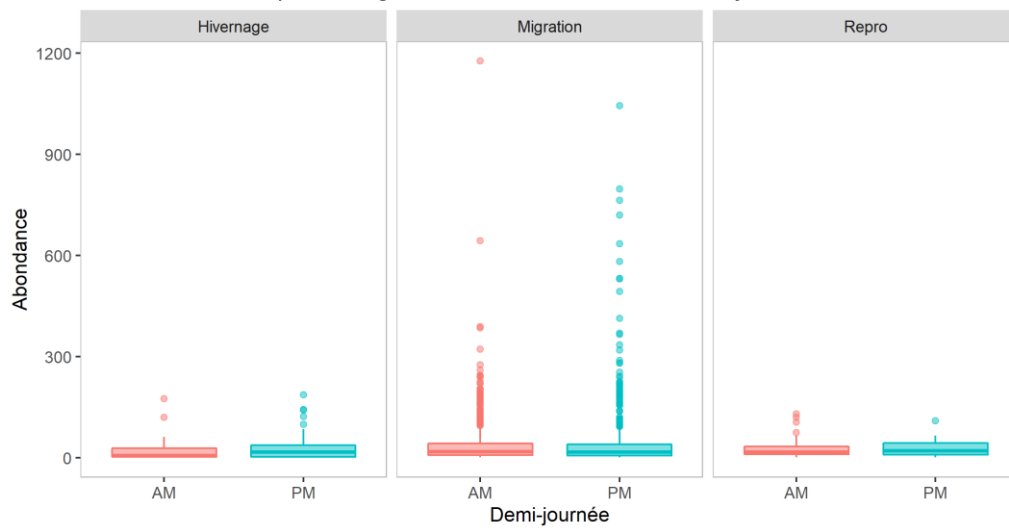
Abondance de l'espèce *Tringa erythropus* en fonction de la demi-journée



Abondance de l'espèce *Tringa nebularia* en fonction de la demi-journée

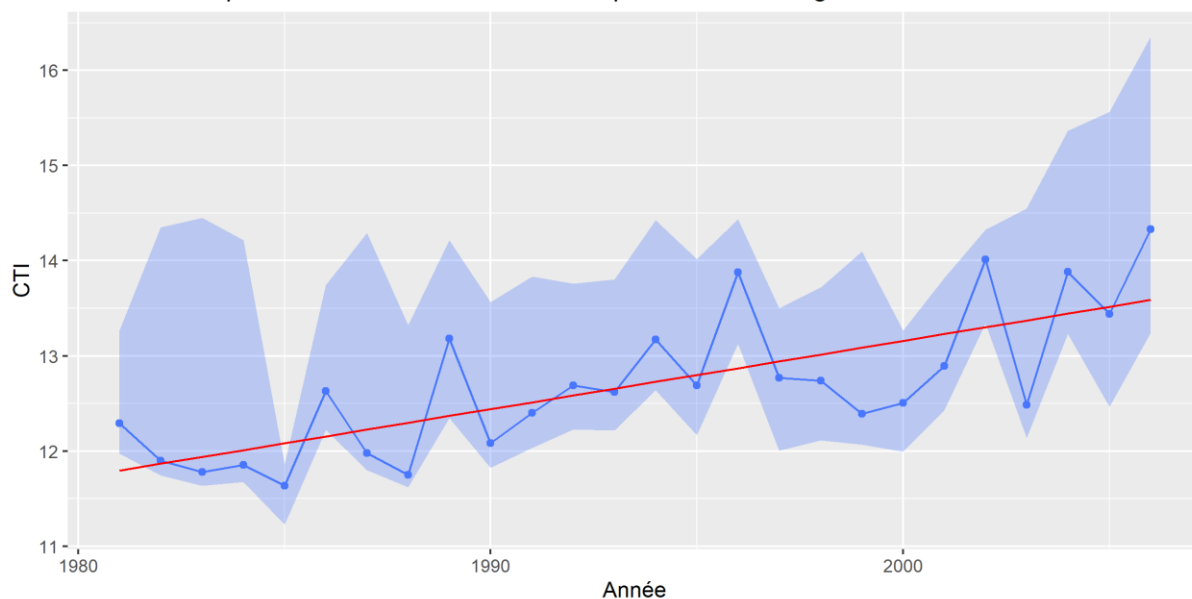


Abondance de l'espèce *Tringa totanus* en fonction de la demi-journée

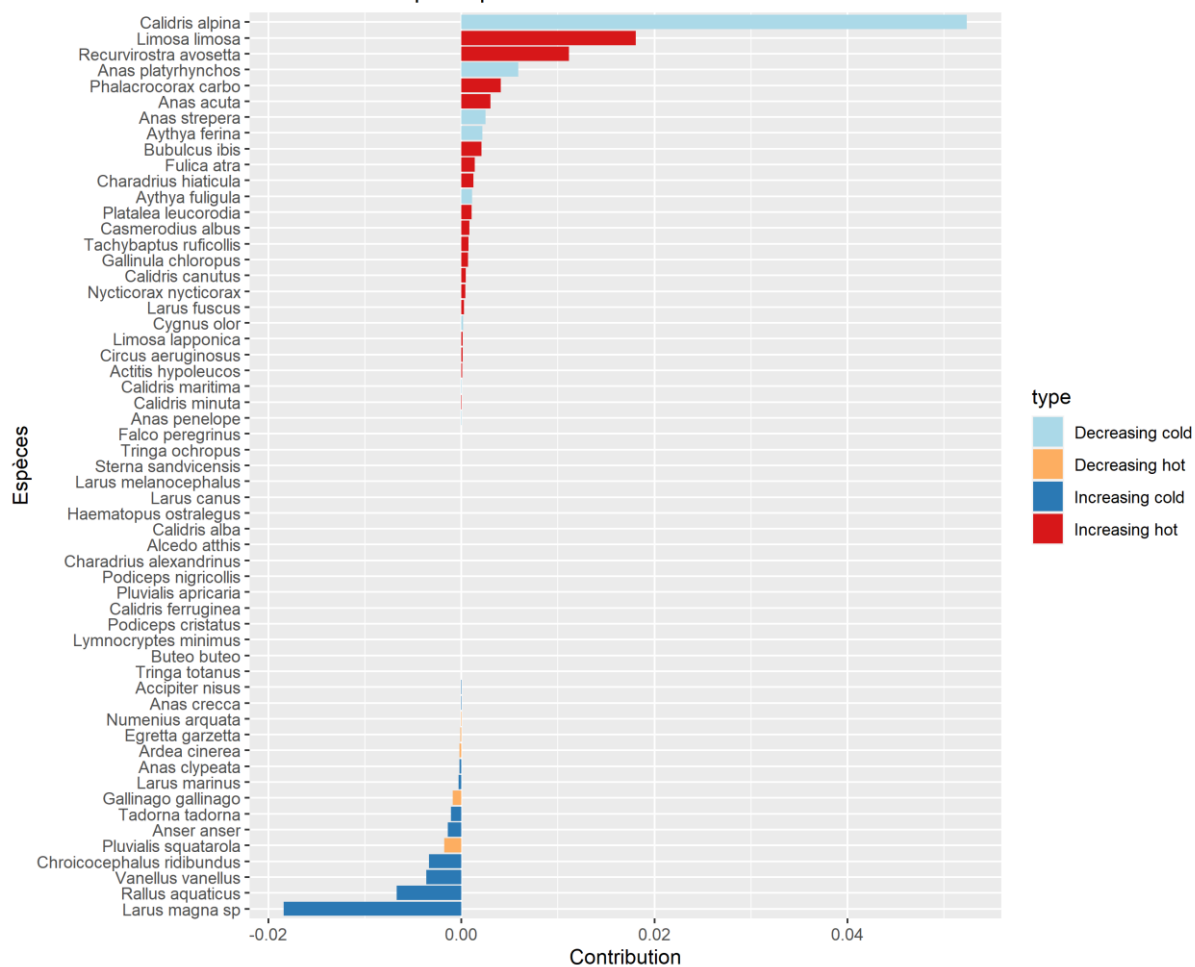


Annexe 9 : Fragments de l'évolution du CTI en période d'hivernage.

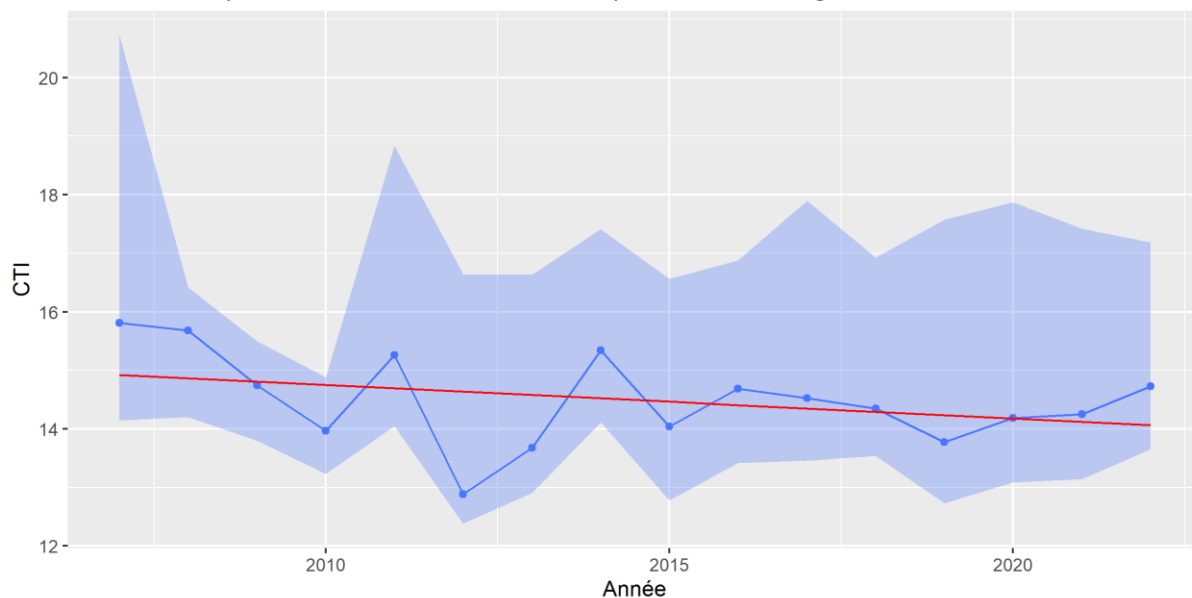
Indice thermique des communautés annuel en période d'hivernage entre 1981 et 2006



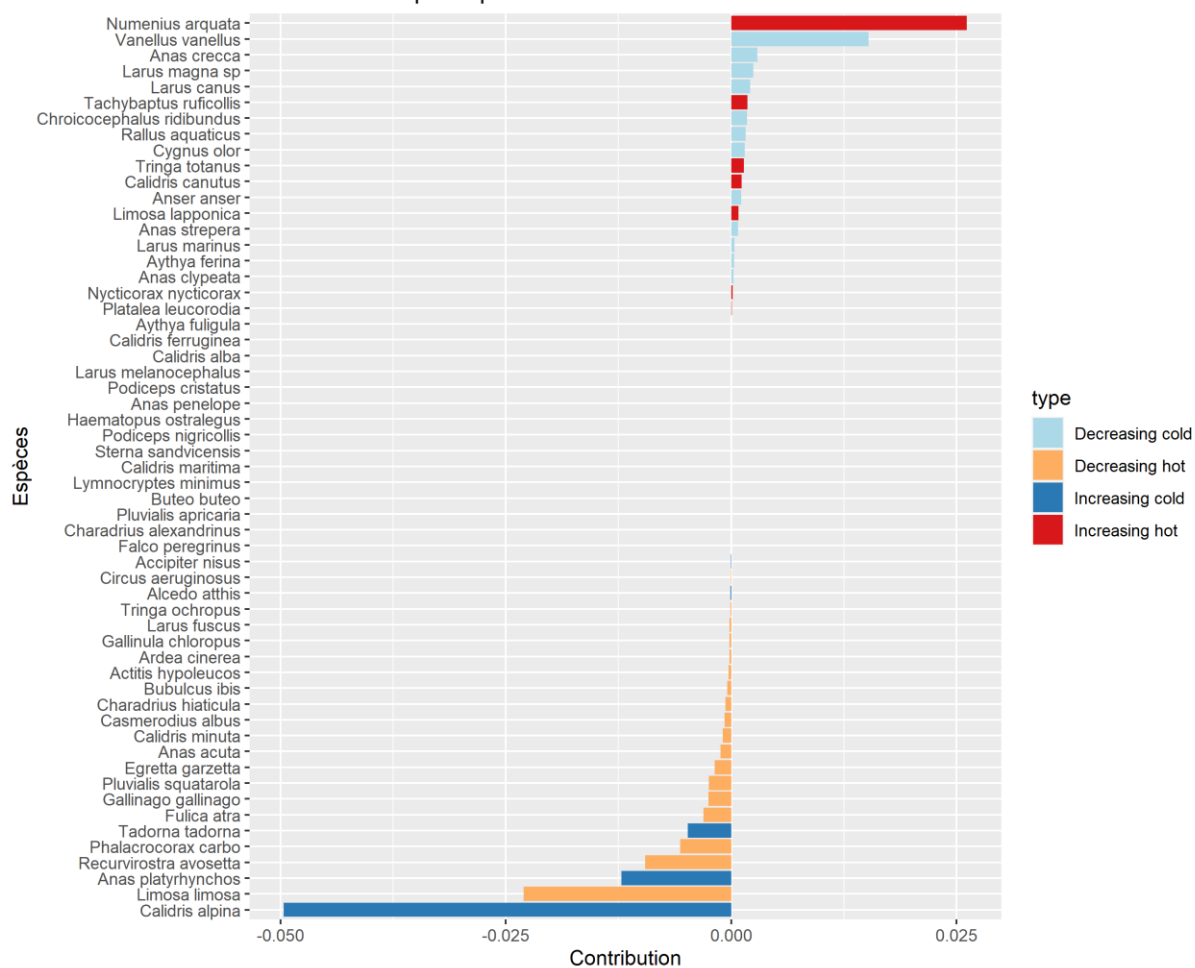
Contributions spécifiques à la variation du CTI entre 1981 et 2006



Indice thermique des communautés annuel en période d'hivernage entre 2007 et 2022

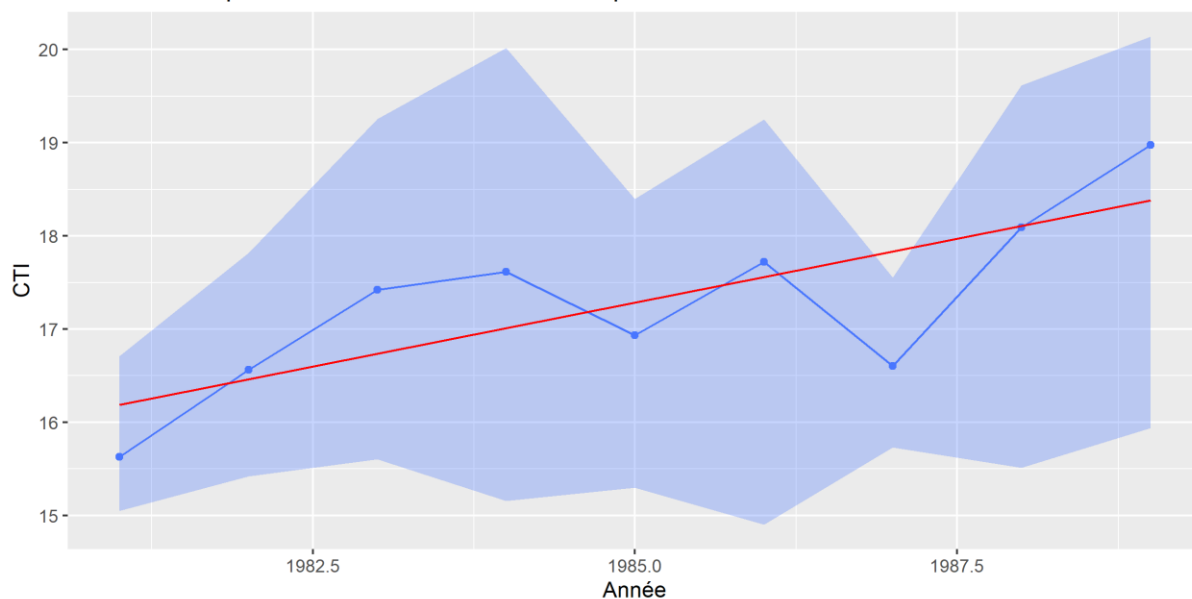


Contributions spécifiques à la variation du CTI entre 2007 et 2022

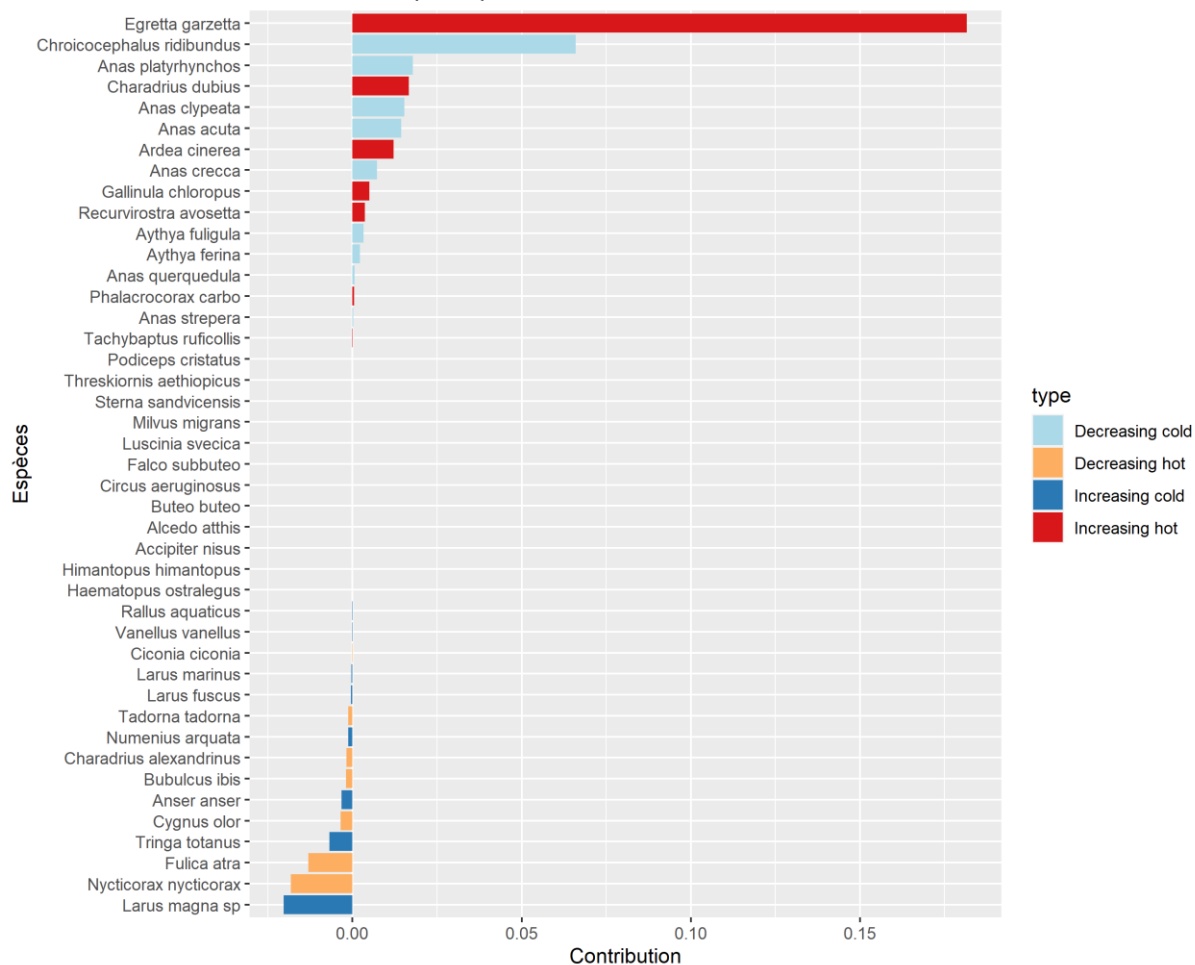


Annexe 10 : Fragments de l'évolution du CTI en période de nidification.

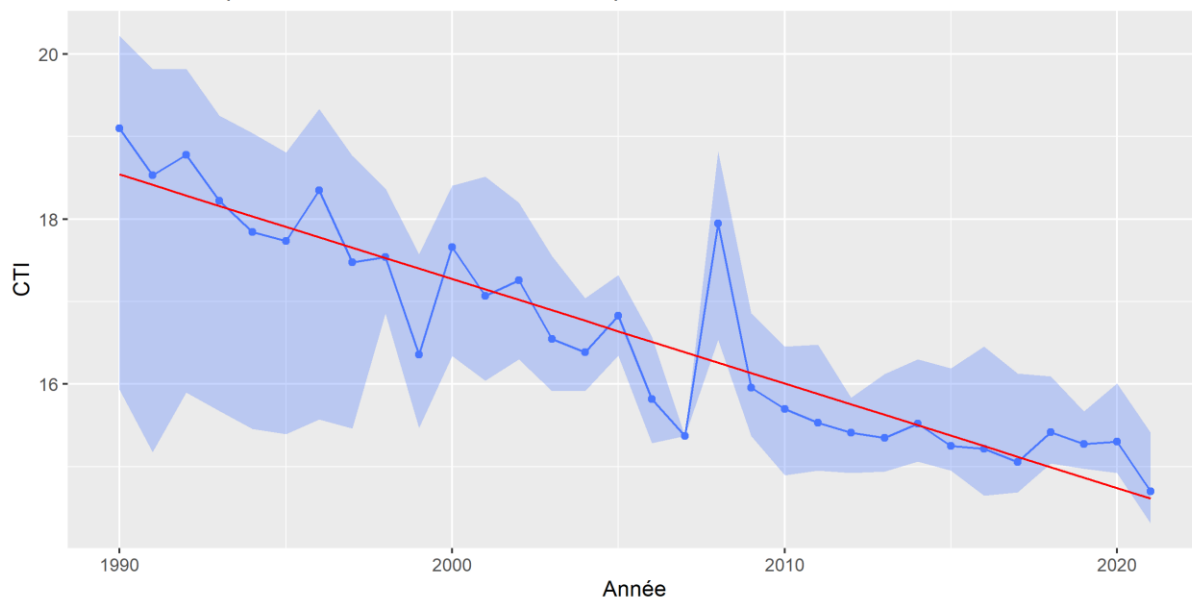
Indice thermique des communautés annuel en période de nidification entre 1981 et 1989



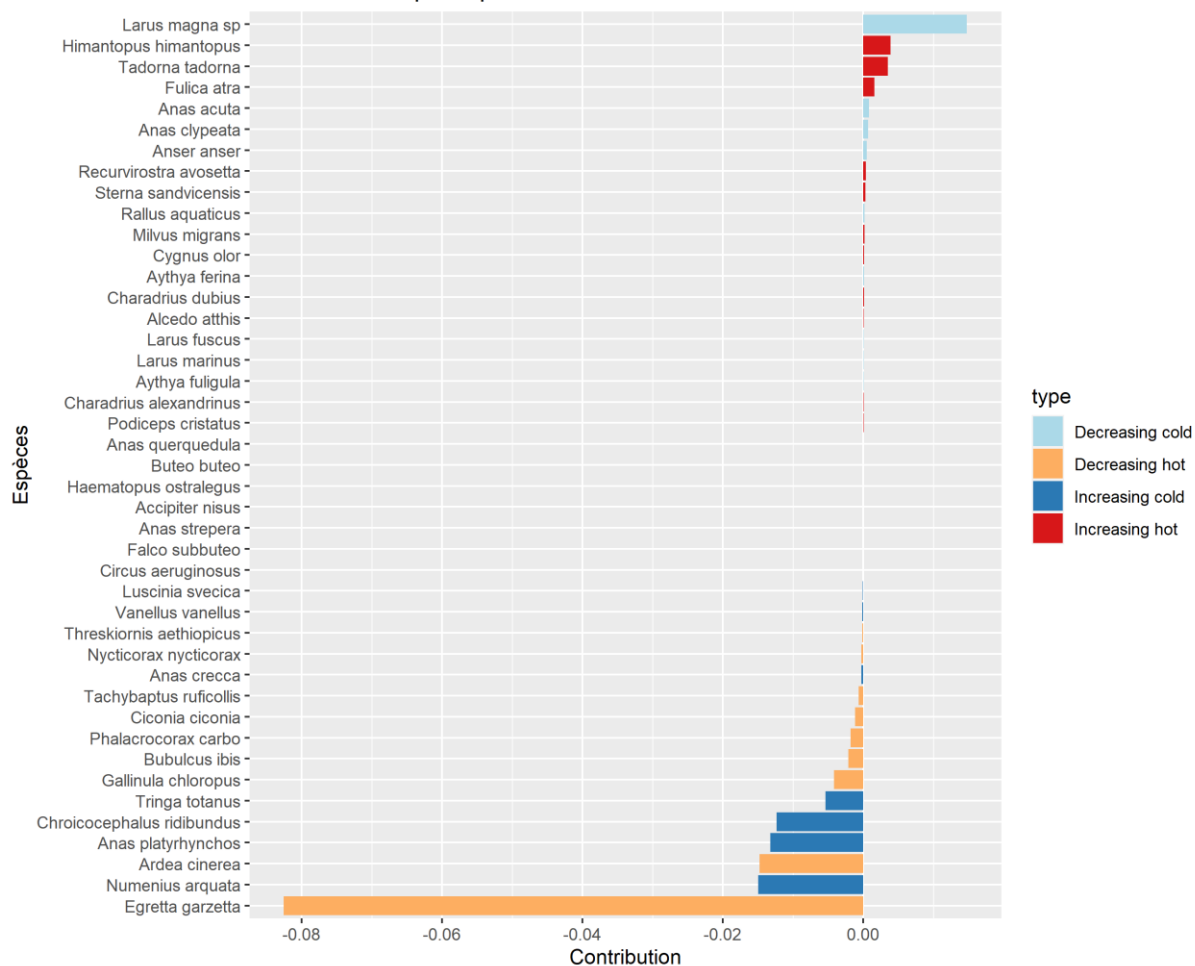
Contributions spécifiques à la variation du CTI entre 1981 et 1989



Indice thermique des communautés annuel en période de nidification entre 1990 et 2022



Contributions spécifiques à la variation du CTI entre 1990 et 2022



Annexe 11 : Prototype de guide de saisie des données de comptage.

Ce guide de saisie vous est proposé afin d'homogénéiser les données de comptage et de faciliter leur interprétation informatique, notamment à l'égard du champ « Commentaires ». La standardisation de la codification est notamment essentielle pour qu'aucune information ne soit perdue dans le processus d'analyse.

ORDRE DE SAISIE

Les différents éléments seront saisis dans l'ordre suivant et séparés d'une virgule « , » :

Marée, Coefficient, Demi-journée, Couverture nuageuse, Pluie, Vent, Température, Visibilité, Etat des plans d'eau, Type de comptage

La précision « Type de comptage » ne concerne pas les observations de passereaux, ni les observations isolées/occasionnelles de l'aro-limicoles.

MARÉE

MAR4	MAR3	MAR2	MAR1	MAR1	MAR2	MAR3	MAR4	
Marée basse	-4h	-2h	-1h	Marée haute	+1h	+2h	+4h	Marée basse

COEFFICIENT

De la forme « **CXX** » ou « **CXXX** ».

Exemples : **C24**, **C98** ou **C105**.

DEMI-JOURNÉE

- AM = Matin
- PM = Après-midi

MÉTÉO

Couverture nuageuse :

- < 25% : Dégagé
- 25-75% : Nuageux
- > 75% : Couvert

Pluie :

- Pluie fine **OU** Bruine
- Pluie **OU** Pluvieux
- Averses **OU** Orage **OU** Grains
- **ATTENTION : Si pas de pluie, ne pas l'écrire !**

Vent :

- **Echelle de Beaufort** : De la forme « Vent **DDD XB** » avec :
 - o « **DDD** » la direction en 1 à 3 lettres (ex : N, SO ou ENE)
 - o « **X** » la **Force** sur l'échelle de Beaufort (*voir annexe en page suivante, colonne « Force »*).*Exemple : Vent **SSE 6B***

OU

- **Echelle arbitraire** : Pas de vent, Vent faible, Vent modéré, Vent fort, Vent violent

Température :

- De la forme **XX°C** ou **-XX°C** avec « XX » la température. *Exemples : -4°C, 20°C...*

Visibilité :

- Ecrire « Brume » si temps brumeux, sinon rien.

Etat des plans d'eau :

- « Assec », « Gel » ou « Submersion » si concerné, sinon rien.

TYPE DE COMPTAGE

Rappel : cet encart ne concerne pas les données de passereaux, ni les observations isolées.

Pour différencier les données de comptage des observations opportunistes, signaler qu'il s'agit d'un comptage avec l'un des codes suivants :

- **CTR** : Comptage Total sur la Réserve
Exemple : Comptages bi- à tri-mensuels (ROT & Limibass)
- **CTU** : Comptage Total sur l'USN¹
= formulaire
- **CER** : Comptage de l'Espèce sur la Réserve
= comptage d'une espèce ciblée sur l'intégralité de la réserve.
Exemple : Wetlands Avocette
- **CEU** : Comptage de l'Espèce sur l'USN

¹ Unité de comptage

EXEMPLE

Situation sur le terrain :

- -20°C
- Comptage à 9h, 2h15 avant la marée haute
- Temps couvert
- Orage
- Vent nord-est 60km/h
- Coefficient 101
- Plans d'eau gelés
- Pas de brume
- Comptage mensuel

Codification à saisir sur Faune-Aquitaine :

MAR3, C101, AM, Couvert, Orage, Vent NE 7B, -20°C, Gel, CTR

Annexe : Echelle de Beaufort pour la force des vents

ECHELLE DE BEAUFORT				
Force	Appellation	Vitesse du vent en km/h	Effets sur le paysage	Classe
0	Calme	< 1	La fumée monte verticalement. Les feuilles des arbres sont immobiles.	Pas de vent
1	Très légère brise	1 à 5	La fumée indique la direction du vent.	Vent faible
2	Légère brise	6 à 11	On sent le vent sur le visage, les feuilles s'agitent.	Vent faible
3	Petite brise	12 à 19	Les drapeaux flottent.	Vent faible
4	Jolie brise	20 à 28	Les poussières s'envolent. Les petites branches plient.	Vent modéré
5	Bonne brise	29 à 38	Le tronc des arbustes balance. La cime des arbres est agitée.	Vent modéré
6	Vent frais	39 à 49	Le vent siffle. Les branches de large diamètre s'agitent.	Vent fort
7	Grand frais	50 à 61	Les petits arbres balancent. Il est pénible de marcher contre le vent.	Vent fort
8	Coup de vent	62 à 74	Les branches sont susceptibles de casser. La marche contre le vent est très difficile, voire impossible.	Vent violent
9	Fort coup de vent	75 à 88	Envol de tuiles, d'ardoises, chutes de cheminées.	Vent violent
10	Tempête	89 à 102	Dégâts importants aux bâtiments. Les toits sont susceptibles de s'envoler, les arbres peuvent être déracinés.	Vent violent
11	Violente tempête	103 à 117	Ravages étendus et importants.	Vent violent
12	Ouragan	> 118	Catastrophe naturelle.	Vent violent