Spécialité Agronomie

Mémoire de fin d'études

Formation Ingénieur AgroSup Dijon

Formation Initiale

Etude de la biodiversité des milieux agricoles camarguais au regard des pratiques phytosanitaires et du paysage (stage réalisé du 18/03 au 04/08/2019)

Pierre MALLET

Etienne GAUJOUR

Enseignant référent

Thomas GALEWSKI

Arnaud BECHET

Tuteurs de stage

Institut de Recherche de la Tour du Valat

Le Sambuc, 13200, Arles

2019

Année de soutenance : 2019

Résumé

La biodiversité est indispensable que ce soit pour elle-même ou pour les services écosystémiques qu'elle rend à la société. Pourtant, une part importante de la biodiversité est aujourd'hui menacée. Celle des oiseaux dans les milieux agricoles l'est particulièrement à cause de l'utilisation de produits phytopharmaceutiques (PPP) et de la simplification des paysages agricoles. J'ai étudié les liens entre ces deux variables et la fréquentation des parcelles agricoles par les oiseaux en Camargue, où de nombreux oiseaux d'intérêts communautaires fréquentent les agroécosystèmes.

Pour ce faire, j'ai analysé les données récoltées lors du projet Farmland où les oiseaux des parcelles de riz et de blé dur ont été échantillonnés en 2013. L'utilisation de modèles à effets mixtes permet d'étudier les variables d'intérêt, ici l'indice de fréquence de traitement phytosanitaire (IFT) et la proportion de milieux semi-naturels et d'infrastructures agroécologique (IAE) dans le paysage. Grâce à ces analyses, j'ai pu mettre en évidence une diminution de la richesse spécifique des oiseaux dans les parcelles de riz avec l'augmentation de l'IFT. Cela peut s'expliquer par l'impact qu'ont les pesticides sur les réseaux trophiques en diminuant la ressource alimentaire. J'ai également mis en évidence une augmentation de la diversité et de la richesse spécifique des oiseaux avec la proportion de milieux semi-naturels et d'IAE dans le paysage. Cette tendance s'explique par le rôle de zones refuges exercé par ces milieux. Ceux-ci vont réussir à atténuer l'impact négatif des PPP car pour des IFT faible, les parcelles implantées dans des paysages avec de nombreux milieux semi-naturels vont garder une abondance en oiseaux élevée.

Mots-clés :

Agriculture, Biodiversité, Agroécologie, Oiseaux, Camargue

Abstract

Biodiversity is essential for itself and for its ecosystem services. However, there are many threats on this biodiversity. Due to the use of pesticides and the landscape simplification, bird's biodiversity is especially threatened. I analysed the links between these two variables and the birds field frequentation in Camargue, where there are a lot of communal interest birds in the agroecosystem.

I analysed the bird's data collected by the Farmland project in 2013 in field rice and wheat. Mixed model effects allow to studied the interest variable, here the intensity of pesticides use and the proportion in the landscape of semi-natural area and agroecological infrastructures. With these analyses, I showed that the intensive use of pesticides decreases the species richness of birds in rice field. This result can be explained by the negative impact of pesticides on the trophic chain and the limitation of food resource. I also showed an increase of the diversity and a the species richness of birds with the increase of landscape of semi-natural area proportion in the landscape. This pattern is explained by the refuge function of these areas. Moreover, these semi-natural areas can mitigate the negative impact of pesticides. In fact, if the intensity of pesticide use is weak, fields located in a landscape with a large proportion of semi-natural areas keep an high bird's abundance.

Keywords:

Agriculture, Biodiversity, Agroecology, Birds, Camargue

Sommaire

Résumé .....

Abstract .....

1 Introduction 1

2 Contexte 2

2.1 Les synergies entre agriculture et biodiversité 2

2.1.1 La biodiversité des milieux agricoles 2

2.1.2 Les produits phytopharmaceutiques 3

2.1.3 Les infrastructures agroécologiques 4

2.2 La Camargue, un territoire unique pour le développement de l'agroécologie 4

2.2.1 Historique agricole de la Camargue 4

2.2.2 Une agriculture camarguaise atypique 5

2.2.3 Une agriculture camarguaise à l'équilibre fragile 8

2.2.4 Un manque de connaissances sur le fonctionnement des milieux agricoles 10

2.2.5 Les synergies en Camargue 10

2.3 Les oiseaux 11

2.3.1 Indicateurs de biodiversité 11

2.3.2 Les oiseaux des milieux agricoles de Camargue 12

2.4 Le projet FarmLand 13

2.4.1 Initiative et description du projet FarmLand 13

2.4.2 Le projet FarmLand en Camargue 14

3 Objectifs et problématique du stage 15

3.1 Objectifs et question de recherche 15

3.2 Hypothèses 15

4 Matériel et méthodes 16

4.1 Parcelles agricoles 16

4.2 Paysage 16

4.3 Suivi ornithologique 18
4.4 Traitement des données 18
5 Résultats 19
5.1 Comparaison des niveaux de biodiversité entre riz et blé dur 19
5.2 Effet des traitements phytopharmaceutiques sur les oiseaux et interaction avec le paysage 24
5.2.1 Description des paysages étudiés 24
5.2.2 Diversité des oiseaux 24
5.2.3 Effet sur l'abondance 25
5.2.4 Effet sur la richesse spécifique 26
6 Discussion 27
6.1 Comparaison riz-blé dur 27
6.2 Impact des traitements phytosanitaires sur la biodiversité 28
6.3 Impact des IAE sur la biodiversité 29
7 Conclusion 32
Bibliographie 33
Annexes 38
Annexe 1 : liste IUCN des espèces nicheuses en Camargue et menacée au niveau régional 38
Annexe 2 : Tableau espèces uniques aux parcelles de riz et de blé dur 39
Annexe 3 : Tableau récapitulatif des résultats des modèles à effets mixtes 40

Liste des figures :

Figure 1 : Occupation du sol en Camargue en 2016. 6
Figure 2 : Schéma de successions culturales possibles en Camargue. 7
Figure 3 : Assolement camarguais 2017. 7
Figure 4 Dynamique d'évolution des surfaces rizicultivées en relation avec des conjonctures économiques (Mouret 2018a). 8
Figure 5 : Carte de localisation (d'après Sirami et al., 2013) des régions participant au programme FarmLand. 13
Figure 6 : Carte des paysages suivi en Camargue.. 14
Figure 7 : En haut, histogramme du nombre de parcelles de riz par valeur d'IFT. En bas, histogramme du nombre de parcelles de blé dur par valeur d'IFT. 20
Figure 8 : Evolution de l'abondance des oiseaux dans les parcelles de riz en fonction de l'IFT total appliqué pour cinq valeurs de diversité de milieux semi-naturels différentes. 25

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Tableau comparatif des moyennes des différentes métriques de diversité entre les parcelles de riz et de blé dur avec leur significativité. 21
Tableau 2 : En haut, tableau des espèces d'oiseaux présentent dans les parcelles de riz. En bas, tableau des espèces d'oiseaux présentent dans les parcelles de blé dur. 24
Tableau 3 : Description des variables caractérisant les 32 paysages étudiés. 24
Tableau 4 : Moyenne pondérée par le poids d'AIC de l'indice de Shannon des parcelles de riz 25
Tableau 5 : Moyenne pondérée par le poids d'AIC de l'abondance des oiseaux dans les parcelles de blé dur 26
Tableau 6 : Moyenne pondérée par le poids d'AIC de la richesse spécifique des oiseaux dans les parcelles de riz 26
Tableau 7 : Moyenne pondérée par le poids d'AIC de la richesse spécifique des oiseaux dans les parcelles de blé dur. 27

Liste des abréviations :

AC : Agriculture Conventionnelle

AFB : Agence Française pour la Biodiversité

AICc : Akaike Information Criterion corrected

CFR : Centre Français du Riz

CTE : Contrat Territorial d'Exploitation

FAO : Food and Agriculture Organisation

GATT : General Agreement on Tariffs and Trade

HVN : Haute Valeur Naturelle

IAE : Infrastructure Agro-Ecologique

IFT : Indice de Fréquence de Traitement

Inra : Institut National de la Recherche Agronomique

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

IUCN : International Union for Conservation of Nature

MAECt : Mesures Agro-Environnementales Climatiques territorialisées

SAU : Surface Agricole Utile

STH : Surface Toujours en Herbe

PAC : Politique Agricole Commune

PNRC : Parc Naturel Régional de Camargue

PPP : Produit phytopharmaceutique

UNESCO : United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

1 Introduction

Depuis le milieu du vingtième siècle, une profonde modification des systèmes de production agricole s'est opérée à travers le monde et notamment en Europe. Le passage d'une agriculture principalement vivrière à une agriculture plus intensive a permis d'augmenter les rendements de manière exponentielle (Cassman 1999). Cette mutation des systèmes agricoles a été rendue possible par l'amélioration de la mécanisation des pratiques, l'utilisation croissante d'intrants chimiques de synthèse tels que des fertilisants et des produits phytopharmaceutiques, le perfectionnement des systèmes d'irrigation, l'amélioration génétique des plantes et d'autres technologies issues de la « révolution verte » (Tilman et al. 2001; Guichard et al. 2017). Ces nouvelles pratiques ont permis d'accroître la sécurité alimentaire et d'améliorer la nutrition à travers le monde (FAO 2018).

Cependant, ce modèle montre aujourd'hui ses limites aussi bien d'un point de vue technique, puisque les rendements stagnent (Ray et al. 2012), que du point de vue social et environnemental. Les agriculteurs doivent notamment faire face à des conditions économiques difficiles et des aléas climatiques de plus en plus fréquents. Cela mène à une diminution constante du nombre d'agriculteurs et des détresses psychologiques dans la profession, conduisant parfois jusqu'au suicide (Khireddine-Medouni et al. 2016). L'image de l'agriculture s'est également beaucoup ternie ces dernières décennies. Les produits phytopharmaceutiques font par exemple l'objet d'une grande défiance de la part de l'opinion publique, notamment vis-à-vis de leur impact négatif possible pour la santé des agriculteurs et des consommateurs. L'agriculture est également la deuxième source d'émission de gaz à effet de serre dans le monde, contribuant directement aux dérèglements climatiques en cours (IPCC 2014). L'érosion de la biodiversité observée aujourd'hui est aussi en partie liée à l'intensification de l'agriculture (Millennium Ecosystem Assessment 2005; Ceballos et al. 2017). Si la déforestation à des fins agricoles a des conséquences désastreuses et connues sur la biodiversité des forêts tropicales, de plus en plus d'études mettent en évidence la raréfaction de la biodiversité dans les milieux agricoles eux-mêmes, notamment en Europe (Green et al. 2005; Henle et al. 2008). Deux résultats récents ont plus particulièrement marqué l'opinion publique. Le premier est la diminution de 33 % de l'abondance des oiseaux des milieux agricoles en France depuis 1989 (AFB 2018). Le second est, sur la même période, la diminution de 75 % de l'abondance des insectes dans les zones protégées en Allemagne, avec comme possible facteur explicatif l'intensification des pratiques agricoles (Hallmann et al. 2017).

La protection de la biodiversité est pourtant indispensable, que ce soit pour elle-même ou pour les services écosystémiques qu'elle rend à la société : services de support, d'approvisionnement, de régulation et services socioculturels (Rodríguez et al. 2006). La recherche de synergies entre production agricole et protection de la biodiversité est donc un enjeu majeur de notre époque (Laurans and Rankovic 2019). Le travail présenté ici a pour objectif d'étudier les impacts de l'usage des produits phytopharmaceutiques sur les oiseaux et l'intérêt de conserver des milieux semi-naturels au sein des agroécosystèmes de Camargue. Cette recherche est indispensable pour pouvoir par la suite conseiller les agriculteurs sur les changements nécessaires de leurs systèmes, et ainsi de trouver des compromis entre conservation de la biodiversité et production agricole tout en limitant les intrants de synthèse.

2 Contexte

2.1 Les synergies entre agriculture et biodiversité

2.1.1 La biodiversité des milieux agricoles

Les milieux agricoles représentent 37 % de la surface terrestre mondiale (DataBank 2016) et hébergent une part significative de la biodiversité ; 50 % des espèces sauvages en Europe par exemple (Herzog et al. 2013). C'est particulièrement vrai en France où le pâturage maintient par exemple des prairies alpines plus riches en espèces que les forêts environnantes (Anthelme et al. 2001). De même, c'est dans quelques parcelles cultivées de Camargue que les 50 derniers couples de glaréoles à collier (*Glareola pratincola*) du pays ont trouvé refuge (Vincent-Martin 2007). En retour, la biodiversité des milieux agricoles fournit des services écosystémiques indispensables à l'agriculture et à la société (Inra 2017). En effet, les services tels que la pollinisation, le contrôle des ravageurs et des maladies des cultures influencent directement les rendements agricoles (FAO 2019).

Dans certains milieux, une biodiversité remarquable côtoie une activité anthropique forte (Mittermeier et al. 1999). C'est le cas des zones agricoles à Haute Valeur Naturelle (HVN), définies à l'échelle européenne par leur biodiversité élevée : on y retrouve notamment plusieurs zones pastorales de moyenne montagne, des régions dominées par un système de polyculture-élevage ou encore des zones humides (Poux and Pointereau 2014). Pour maintenir, voire améliorer, les niveaux élevés de biodiversité dans ces territoires, il est nécessaire de comprendre les interactions entre activités agricoles et biodiversité. Cela permettra d'identifier non seulement les pratiques vertueuses à privilégier mais aussi les atouts de cette biodiversité pour l'agriculture. Grâce à cela, il sera possible de conseiller les agriculteurs et les gestionnaires

d'espaces naturels ou d'influencer les politiques publiques pour mettre en avant les bonnes pratiques ou construire des MAECt favorables à la biodiversité.

Selon Mclaughlin and Mineau (1995), les opérations culturales ayant le plus d'impact sur la biodiversité et les rendements sont le travail du sol, la succession, la fertilisation et l'utilisation de produits phytopharmaceutiques (PPP). Concernant les PPP, il existe une demande sociétale forte pour diminuer leur utilisation. Cette demande se traduit au niveau national par la mise en place de différentes actions comme le plan Ecophyto. De nombreuses questions se posent donc actuellement pour trouver des alternatives à l'utilisation de ces intrants.

2.1.2 Les produits phytopharmaceutiques

Les PPP sont utilisés pour lutter contre des bio-agresseurs des cultures et permettre de limiter les pertes de rendements (Pimentel 2009). Cependant, les PPP peuvent avoir des effets indésirables sur les autres espèces qui fréquentent les milieux agricoles de manière (i) directe, l'application du produit va impacter la population d'une espèce non cible ou (ii) indirecte, la disparition du bio-agresseur va modifier la chaîne trophique et ainsi impacter les autres espèces (Wendt-Rasch et al. 2003; Gibbons et al. 2015). Ce sont principalement par ces deux types d'effets que les PPP ont un impact négatif sur la biodiversité, notamment sur les espèces situées en haut de la chaîne trophique (Gibbs et al. 2005). Une revue de la littérature réalisée par Hole et al. (2005) montre que dans les parcelles où aucun PPP n'est appliqué, l'abondance des oiseaux est environ 2,6 fois plus élevée et la richesse spécifique 2 fois plus grâce notamment à une ressource alimentaire en invertébrés plus importante dans les parcelles sans traitement phytosanitaire.

Devant la crise de la biodiversité actuelle (Ceballos et al. 2017), il est nécessaire de chercher des solutions pour restaurer la biodiversité, en limitant notamment l'utilisation des PPP – comme le demande le plan Ecophyto – dans les systèmes agricoles sans impacter négativement leurs rendements : ce sont les objectifs de l'agroécologie. L'agroécologie peut se définir comme un ensemble de pratiques agricoles basé sur les processus écologiques contribuant à des systèmes de production agricoles durables (Wezel et al. 2009). La bonne gestion des processus écologiques nécessite (i) l'existence d'infrastructures agroécologiques offrant des habitats favorables à la biodiversité qui pourra offrir des services

écosystémiques ; et (ii) des pratiques culturales favorables à ces processus qui auront notamment pour but d'augmenter la biodiversité qui utilise les parcelles.

2.1.3 Les infrastructures agroécologiques

Une meilleure gestion des services écosystémiques peut permettre de diminuer l'utilisation de produits phytopharmaceutiques tout en maintenant des rendements élevés (Wezel et al. 2014). Un moyen d'y parvenir passe par l'implantation d'infrastructures agroécologiques (Meehan and Gratton 2015). Ces infrastructures correspondent aux habitats semi-naturels où se développe une végétation spontanée (bandes enherbées, haies, zones humides…) (Sarthou 2016). Des infrastructures fourniront des services différents en fonction des taxons favorisés par chacune d'elles. Les bandes enherbées vont ainsi avoir tendance à favoriser les pollinisateurs (Rands and Whitney 2011), tandis que les haies seront surtout favorables aux oiseaux insectivores (Hinsley and Bellamy 2000). Ces effets peuvent cependant être variables selon le contexte agricole et les taxons considérés. Les haies sont par exemple intéressantes pour différentes espèces de passereaux comme les pie-grièches écorcheurs (*Lanius collurio*) ou les bruants zizis (*Emberiza cirlus*), mais sont évitées par les espèces associées aux milieux ouverts comme les outardes canepetières (*Tetrax tetrax*) ou les busards cendrés (*Circus pygargus*), deux espèces au statut de conservation très défavorable (IUCN 2019). Les infrastructures agroécologiques à prioriser vont donc dépendre du contexte agricole et des enjeux de conservation identifiés pour un territoire donné. Il est donc important de réaliser un travail de recherche multi-acteurs au niveau local afin d'identifier les attentes de chaque partie prenante (Steingröver et al. 2010; Landis 2017).

2.2 La Camargue, un territoire unique pour le développement de l'agroécologie

2.2.1 Historique agricole de la Camargue

La Camargue est une zone humide de 150 000 ha située dans le delta du Rhône (Blondel et al. 2013). Malgré son caractère sauvage et la perception qu'en ont les gens, elle a été façonnée au cours des siècles par l'Homme qui, aujourd'hui encore, continue d'entretenir et d'installer des aménagements tels que des digues et des canaux afin de contenir les crues du Rhône et les entrées marines et ainsi pouvoir exploiter les ressources de ce territoire (Donadieu 1996).

Des écrits confirment la présence humaine en Camargue dès la période grecque (soit de 2700 à 1200 avant J.C.) (Parc Naturel Régional de Camargue 2005). Les premières traces d'activités agricoles en Camargue furent l'implantation de blé et de vigne, qui date de l'époque romaine, au premier siècle avant J.C. et concorde avec la construction de la ville d'Arles. Les différentes cultures étaient alors installées sur les bourrelets alluviaux du fleuve afin d'être à l'abri des crues.

Les premiers aménagements hydrauliques furent la construction de digues dans le but de maîtriser les inondations par le Rhône et ainsi améliorer les conditions de culture (Vassas and Vigneron 1980). Ces grands aménagements commencèrent à partir du XVII^{ème} siècle et se poursuivirent par la construction de nombreux canaux de navigation et d'assainissement encore visibles aujourd'hui comme le canal de Beaucaire à Aigues-Mortes. Ces différents travaux ont permis de développer une agriculture vivrière de polyculture-élevage jusqu'à la fin du XIX^{ème} siècle (Parc Naturel Régional de Camargue 2005). Ce fut ensuite la viticulture qui se développa pour devenir la première production agricole en Camargue.

Cependant, les endiguements successifs de la Camargue au cours des siècles ont eu pour conséquence une salinisation rapide des sols qui ne sont alors plus lessivés par les crues du Rhône (Blondel et al. 2013). Au début du XX^{ème} siècle, l'irrigation artificielle devient donc indispensable. En 1942 sont implantés les premiers hectares de riz, une culture qui nécessite une importante quantité d'eau douce (environ 20 000 m^3 par an et par hectare ; Mouret 2018a). Cette culture inondée permet une désalinisation des terres agricoles indispensable pour la production d'autres cultures telles que le blé, le tournesol ou la luzerne. Dynamisée par les financements issus du plan de relance économique Marshall, cette culture s'imposera rapidement comme la principale production de Camargue. Les surfaces agricoles vont alors rapidement augmenter et prendre le pas sur les milieux naturels. Alors que seul un tiers de la Camargue était dédié à l'agriculture en 1942, deux tiers le sont en 1984 (Tamisier and Dehorter 1999).

2.2.2 Une agriculture camarguaise atypique

La plaine deltaïque de Camargue située à cheval entre les départements du Gard et des Bouches-du-Rhône (Figure 1).

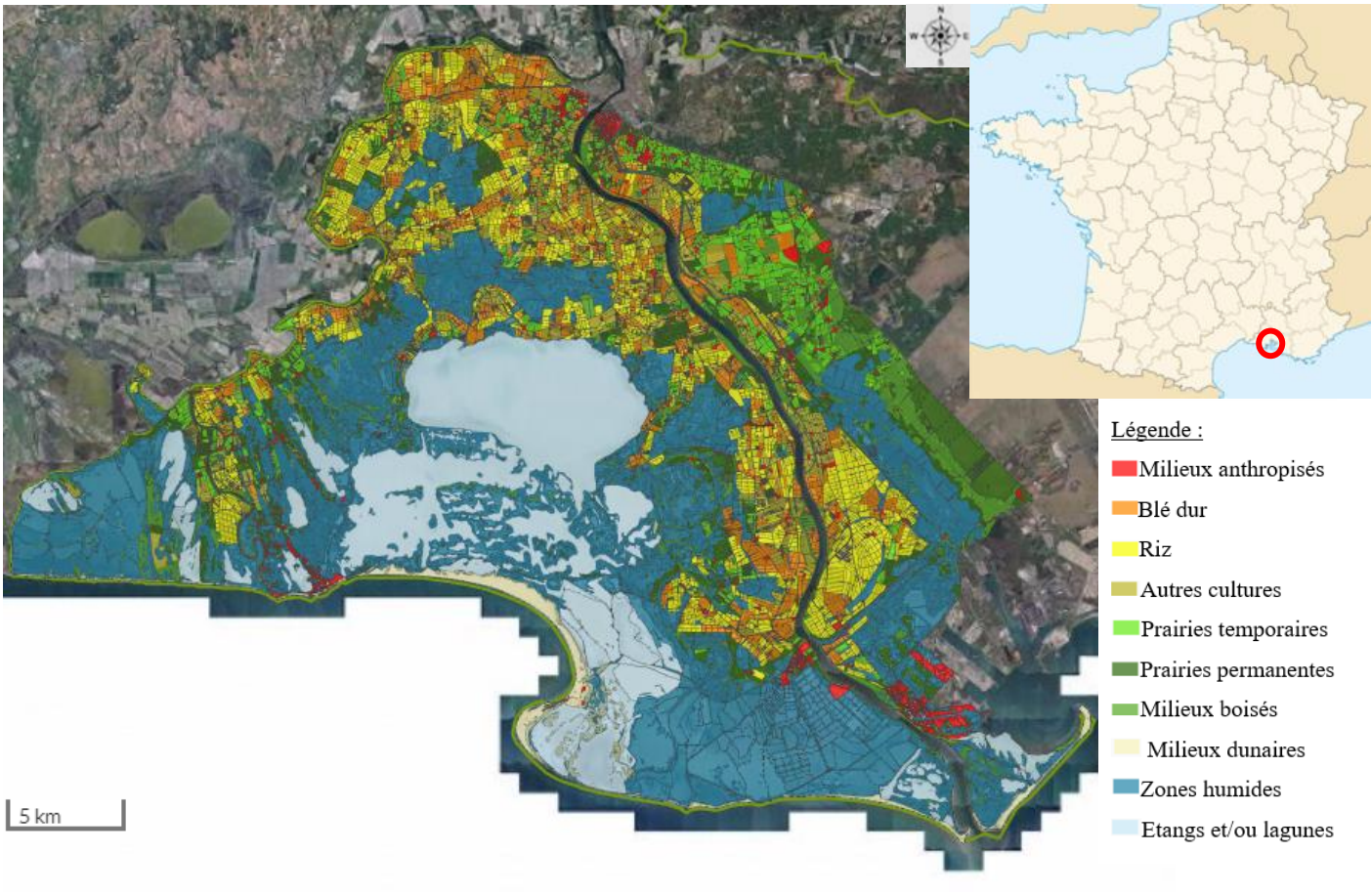


Figure 1 : Occupation du sol en Camargue en 2016. Source : http://sit.pnrpaca.org

Les paysages agricoles camarguais sont variés et beaucoup d'exploitations présentent historiquement un système de polyculture-élevage extensif où se juxtaposent des grandes cultures, des prairies et des milieux semi-naturels (marais, steppes salées, sansouïres, pelouses sèches, boisements) (Delmotte et al. 2013). Aujourd'hui, la Camargue compte 249 exploitations qui se partagent 37 300 ha de surface agricole utile (SAU). Dix-huit pourcents de cette SAU sont cultivés sous le cahier des charges de l'agriculture biologique. Dans les parcelles en grandes cultures, le riz et le blé dur sont les principales cultures de vente (67 % SAU), le riz étant considéré par les agriculteurs comme tête de rotation (Figure 2**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

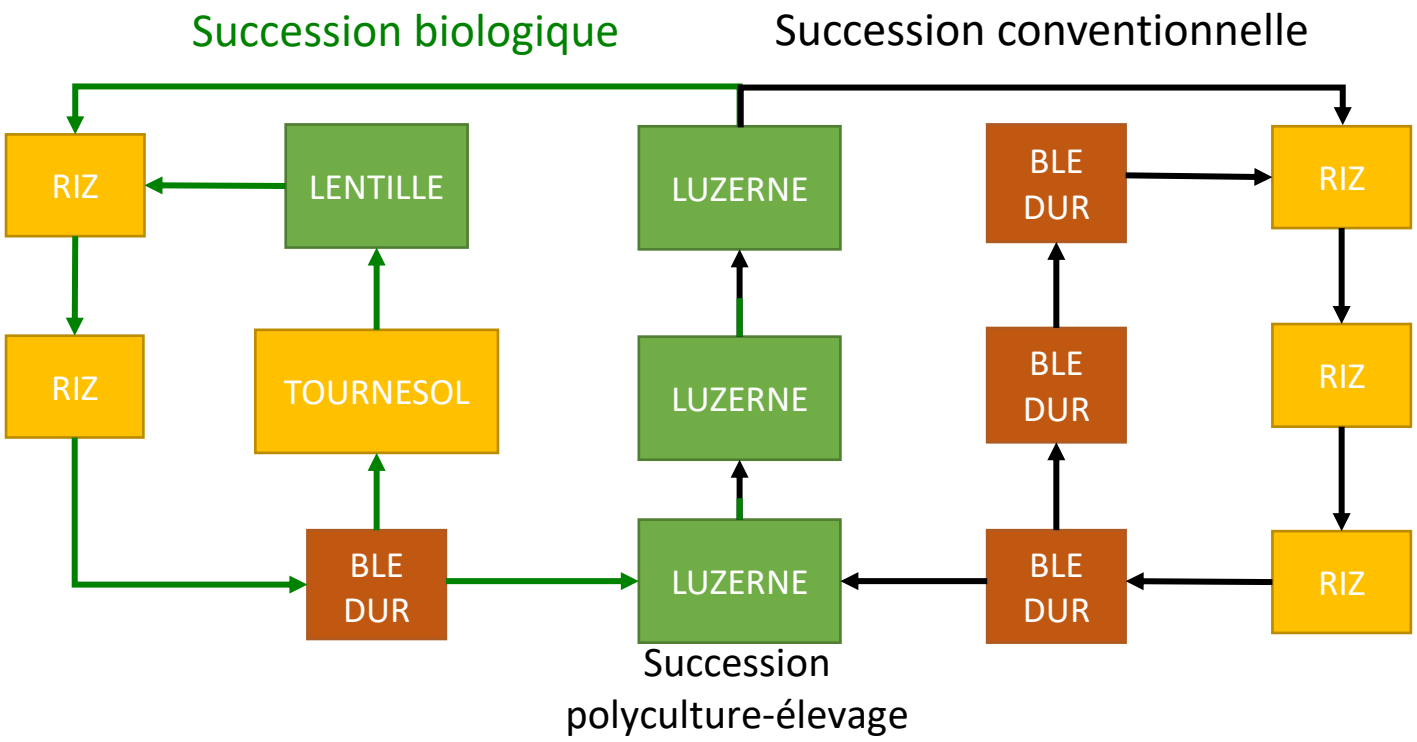


Figure 2 : Schéma de successions culturales possibles en Camargue. Chaque case représente une année de culture

Les grandes cultures représentent donc une part importante de la SAU en Camargue, largement dominée par le riz et le blé (Figure 3).

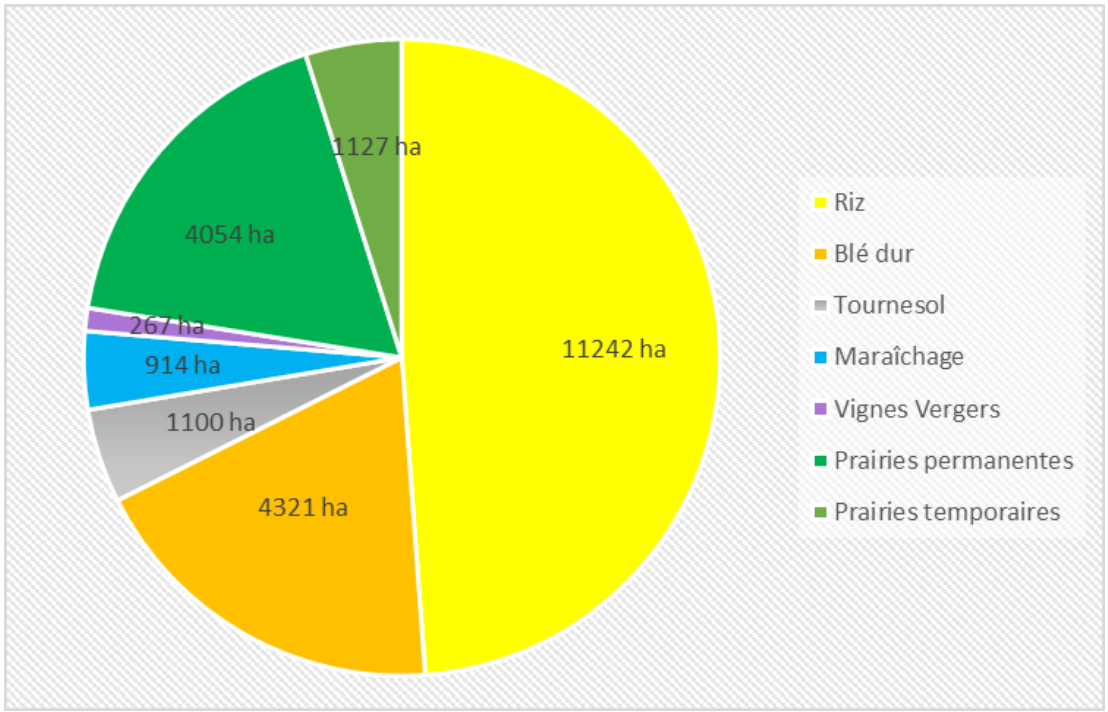


Figure 3 : Assolement camarguais 2017. Données issues du RPG 2017 www.geoportail.gouv.fr.

L'agriculture camarguaise intervient à plusieurs titres dans le maintien des différentes activités en Camargue. Dans le contexte d'un delta aujourd'hui totalement endigué, la culture du riz nécessite de pomper dans le Rhône des volumes importants d'eau douce (20 000 m^3/ha), qui, au-delà de l'irrigation des parcelles, permettent de maintenir en eau des zones humides. Celles-ci sont remarquables par leur biodiversité et sont à la base d'activités économiques importantes localement comme la chasse au gibier d'eau ou le tourisme (Mathevet 2004; Mesléard 2018; Mouret 2018b). De plus, sans cet apport d'eau douce, la salinité des sols devient trop importante et fait chuter les rendements des cultures implantées à la place du riz. C'est un phénomène qui a été observé en 1980 lorsque les surfaces cultivées en riz ont chuté pour ne représenter que 4 400 ha (Figure 4).

2.2.3 Une agriculture camarguaise à l'équilibre fragile

L'agriculture camarguaise doit composer avec un contexte économique et social en évolution. Depuis le début de la riziculture en Camargue, les surfaces cultivées en riz ont énormément varié au cours du temps en fonction des conditions économiques et aujourd'hui en fonction de la répartition des aides de la PAC (Figure 4) (Mouret 2018a).

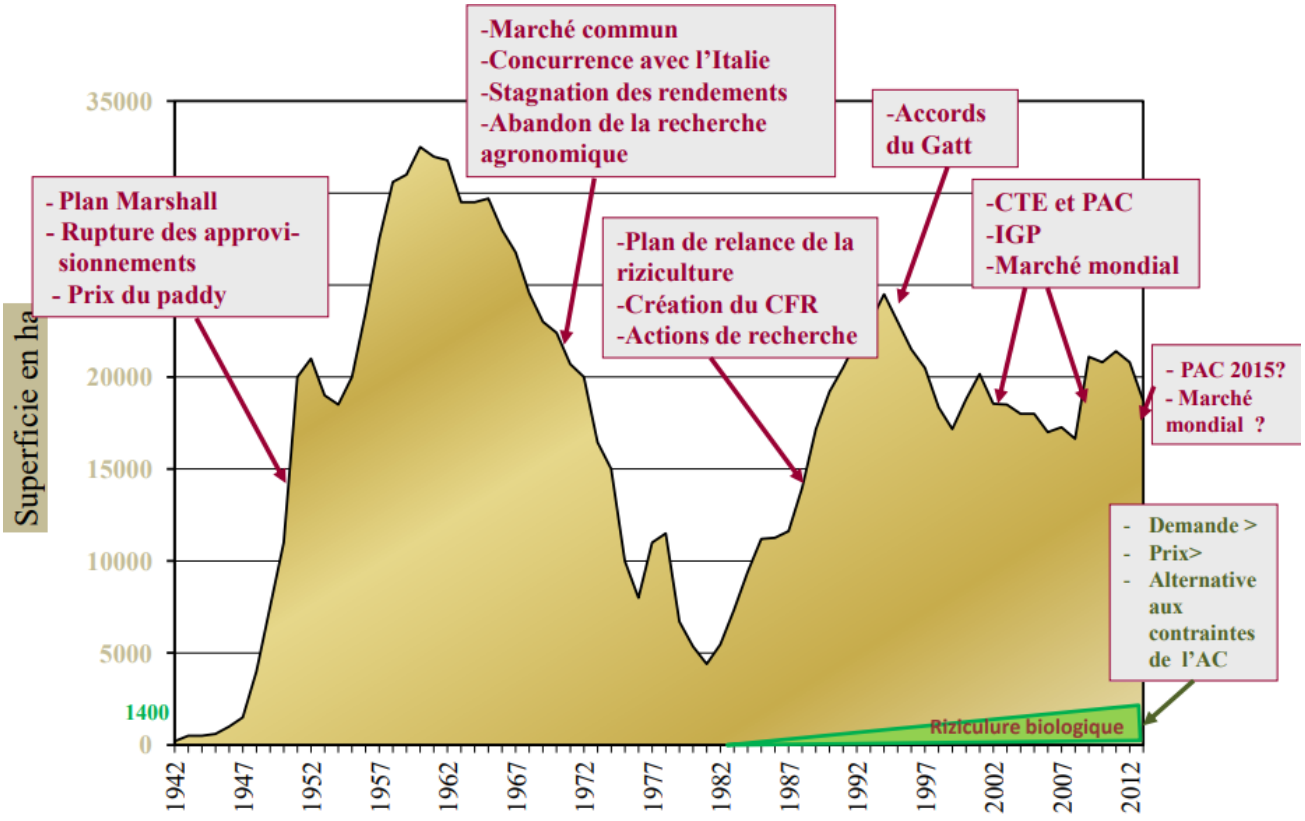


Figure 4 Dynamique d'évolution des surfaces rizicultivées en relation avec des conjonctures économiques (Mouret 2018a).

Aujourd'hui, malgré de nombreuses actions pour stabiliser la production rizicole (plan de relance, création de l'indication géographique protégée riz de Camargue …), la surface rizicole décroît et représente 11 000 ha de la SAU en 2017. Cette tendance résulte de la diminution des aides couplées de la PAC 2015-2020 qui a rendu le riz moins attractif économiquement.

En parallèle, la culture de blé dur se développe en France à partir des années 1950 dans le bassin méditerranéen (ARVALIS - Institut du végétal 2017). Jusqu'en 2010 et la fin des aides couplées à la production, les surfaces de blé dur en Camargue augmentent. Aujourd'hui, il existe de fortes variations de surface puisque la filière reste limitée à l'alimentation humaine comme seul débouché. La vente des grains est donc fortement dépendante de leur qualité, qui peut être altérée par les conditions climatiques.

Des questions écologiques se posent autour de ces cultures puisque de fortes concentrations en pesticides ont été retrouvées dans les tissus des anguilles d'Europe (*Anguilla anguilla*) prélevées dans l'étang du Vaccarès, dans lequel les eaux de drainage des parcelles agricoles se déversent (Oliveira Ribeiro et al. 2005). De plus, à cause de l'utilisation des PPP, des résistances commencent à apparaître ; certaines adventices comme les *Echinochloa* et les Cypéracées sont par exemple très difficiles à contrôler avec les herbicides autorisés en riziculture (CFR 2011).

En parallèle, les comportements des consommateurs évoluent et il y a une augmentation de la demande pour des produits plus sains et respectueux de l'environnement. Cela est illustré par les investissements réalisés par Alpina Savoie et Panzani, respectivement les deux principaux acheteurs de blé dur biologique et de riz conventionnel en Camargue, dans des projets de recherche en faveur de nouveaux modes de productions plus respectueux de la biodiversité. Cette prise en compte de la protection de l'environnement dans les pratiques agricoles peut aussi déboucher sur une meilleure valorisation des produits. L'entreprise Alpina Savoie travaille par exemple sur une communication mettant en avant des produits non seulement certifiés en agriculture biologique mais aussi favorables à la biodiversité.

Face à cette évolution de la demande de la filière, les acteurs locaux du monde agricole (agriculteurs, chambres d'agriculture, centre français du riz…) souhaitent développer une agroécologie dans les systèmes agricoles camarguais. Les pratiques agroécologiques basées sur des processus écologiques pourraient permettre aux agriculteurs de diminuer l'utilisation de produits phytopharmaceutiques.

2.2.4 Un manque de connaissances sur le fonctionnement des milieux agricoles

À ce jour, la majorité des travaux de recherche et des mesures de conservation réalisés en Camargue se sont focalisés sur les milieux semi-naturels (Johnson 1997; Balkiz 2006; Ficheux et al. 2014). Cela a contribué au retour d'un grand nombre d'espèces dans les marais et lagunes de Camargue, notamment des oiseaux d'eau (flamant rose, hérons, mouettes et sternes…). Les milieux agricoles ont quant à eux été très peu étudiés alors que la biodiversité associée à ces milieux s'est considérablement raréfiée ces dernières décennies (Galewski and Devictor 2016). D'un autre côté, si la riziculture est l'objet de nombreuses recherches agronomiques (http://www.centrefrancaisduriz.fr), il n'existe que peu de travaux sur la relation entre production agricole rizicole et biodiversité. Il a cependant été montré que les pratiques agricoles et les infrastructures agroécologiques pouvaient influencer la fréquentation des parcelles agricoles par les oiseaux en Camargue (Tourenq et al. 2002; Ernoul et al. 2012). Or, cette fréquentation peut avoir des bénéfices, comme cela a été démontré avec les canards sauvages qui consomment les graines d'adventices du riz (Brogi et al. 2015; Pernollet et al. 2016). Ces travaux suggèrent un fort potentiel de synergies entre agriculture et biodiversité, qui reste néanmoins largement méconnu et sous-valorisé.

2.2.5 Les synergies en Camargue

Les plaines deltaïques rizicoles font parties de ces milieux agricoles à la biodiversité patrimoniale riche (Bos et al. 2006). La riziculture a la particularité d'être en étroite connexion avec les milieux semi-naturels (Mouret 2018a). Des questions sur les synergies entre ces systèmes agricoles et la biodiversité s'y posent donc (Martínez-Eixarch et al. 2017). La Camargue est une zone humide méditerranéenne reconnue internationalement pour sa biodiversité exceptionnelle, par la Convention de Ramsar, et classée Réserve de Biosphère par l'UNESCO (Blondel et al. 2013). Cette région correspond aux trois types de HVN décrit par Andersen et al. (2004) puisqu'on y retrouve de l'élevage en zone humide, une mosaïque de milieux agricoles et d'espaces semi-naturels ainsi que la présence de nombreuses espèces remarquables. C'est donc un très bon terrain d'étude des enjeux de production et de conservation qui peuvent coexister dans les plaines deltaïques.

À ce jour, il n'y a pas eu de travaux de recherche spécifiquement axés sur l'impact des PPP sur les oiseaux en Camargue. En revanche, plusieurs études ont été menées sur les amphibiens et les communautés de macroinvertébrés qui fréquentent les rizières (Suhling et al.

2000; Mesléard et al. 2016). Mesléard et al. (2005) ont par exemple montré qu'il y a peu d'écarts dans la richesse en familles, mais une abondance réduite dans les communautés de macroinvertébrés des rizières cultivées en conventionnel comparées aux rizières biologiques. Ces différences de communautés peuvent avoir des répercussions sur la fréquentation des rizières par les oiseaux, par exemple sur les différentes espèces de hérons qui viennent se nourrir dans les parcelles agricoles.

Il en est de même pour les IAE qui ont été peu étudiées dans la région. La limitation des incursions de flamants roses (*Phoenicopterus roseus*), qui provoquent des dégâts dans les rizières au moment du semis à cause de la consommation des grains de riz, grâce à la présence de haies autour des parcelles (Tourenq et al. 2001), est le seul résultat connu concernant le rôle des IAE dans les agroécosystèmes camarguais. Cependant cette pratique peut potentiellement pénaliser d'autres espèces à enjeux (ex : glaréoles, sternes) qui pourraient elles aussi être gênées par les haies qui coupent la visibilité face aux prédateurs. Des travaux de recherche sur la compréhension des agroécosystèmes camarguais sont donc nécessaires.

2.3 Les oiseaux

2.3.1 Indicateurs de biodiversité

Les oiseaux sont de bons indicateurs de biodiversité car leur écologie est bien connue et documentée, avec plus de 16 000 publications scientifiques consacrées annuellement à leur biologie. Cet engouement s'explique par l'attrait qu'ils exercent sur les naturalistes, mais aussi parce qu'ils sont assez faciles à suivre, occupent habituellement des niveaux trophiques élevés et sont sensibles aux changements environnementaux (BirdLife International 2013). De plus, les évolutions des populations d'oiseaux reflètent généralement bien celles des autres taxons qui fréquentent les mêmes milieux, notamment dans les milieux agricoles. Ce taxon est par conséquent largement utilisé dans les études qui s'intéressent aux liens entre les agroécosystèmes et la biodiversité (e.g. Chamberlain et al. 2000; Katayama et al. 2015).

Les oiseaux fournissent aussi de nombreux services écosystémiques en tant que prédateurs, pollinisateurs, charognards, disperseurs de graines, prédateurs de graines et ingénieurs de l'écosystème (Whelan et al. 2008). Sous nos latitudes, le service écosystémique majeur rendu par les oiseaux à l'agriculture est celui d'agent de contrôle des bioagresseurs : adventices, insectes et rongeurs. En effet, certaines études comme celle de Holmes and Froud-Williams (2005) suggèrent que l'utilisation des oiseaux en tant que prédateurs de graines

d'aventices pourrait permettre de réduire l'utilisation de pesticides. Concernant la régulation des populations d'insectes ravageurs par les oiseaux, de nombreuses études ont montré un effet « top-down » des oiseaux sur les insectes (Greenberg et al. 2000; Mols and Visser 2002; Boyer et al. 2003; Hooks et al. 2003; Perfecto et al. 2004; Philpott et al. 2004; Jones et al. 2005). La régulation des rongeurs par les rapaces donne des résultats plus mitigés. En effet, les études qui tentent d'augmenter la pression de prédation par l'installation de nichoirs ou de perchoirs n'obtiennnent pas de résutats significatifs concernant le benéfice de la présence des rapaces sur les rendements agricoles (Wood B. J. and Fee Chung Gait 2003; Marti et al. 2005). En revanche, dans des milieux sans prédateurs, on observe une explosion de la densité de rongeurs avec des conséquences directes sur le rendement (Terborgh et al. 2001, 2006).

2.3.2 Les oiseaux des milieux agricoles de Camargue

La Camargue est la plus grande zone humide française et l'un des sites les plus importants pour la reproduction, la migration et l'hivernage des oiseaux d'eau (plus de 100 000 individus dénombrés en janvier). Son importance à l'échelle nationale se confirme par la présence de 16 espèces nicheuses considérées comme menacées par l'IUCN et 49 espèces menacées à l'échelle régionale (IUCN 2019) (Annexe 1). Dans ces listes se trouvent en nombre appréciable plusieurs espèces dont les tendances sont en déclin fort en Europe : moineau friquet (*Passer montanus*), bruant proyer (*Emberiza calandra*), cochevis huppé (*Galerida cristata*) … et pour certaines espèces, la Camargue est même un de leurs principaux bastions à l'échelle nationale comme c'est le cas pour le rollier d'Europe (*Coracias garrulus*) ou le guêpier d'Europe (*Merops apiaster*). Ces espèces utilisent à la fois les écosystèmes semi-naturels et les terres agricoles pour accomplir leur cycle de vie.

À cette guilde d'espèces, s'ajoute tout un cortège d'oiseaux d'eau qui sont présents en Camargue en raison de l'abondance des zones humides, mais qui dépendent également des milieux agricoles du delta pour s'alimenter. Cela concerne en particulier les rizières inondées. C'est par exemple le cas des oiseaux d'eau coloniaux comme l'ibis falcinelle (*Plegadis falcinellus*), dont l'essentiel de la population française est située en Camargue. Cette espèce se nourrit sur les marais naturels en hiver et au début du printemps avant de fréquenter intensément les rizières en été lorsque les marais s'assèchent.

La prédominance des oiseaux d'eau en Camargue laisse à penser que les rizières abritent une diversité et une abondance plus importante que les cultures sèches comme le blé.

Cependant, aucune étude ne s'est penchée sur la différence de composition des communautés d'oiseaux entre les différents types de cultures présents en Camargue.

Alors que les oiseaux d'eau, notamment coloniaux, ont des effectifs plutôt stables voire en augmentation depuis le 19ème siècle, notamment grâce à la protection, les oiseaux liés aux milieux agricoles ont beaucoup régressé (Galewski and Devictor 2016). On ne connaît pas les causes précises de ce déclin même si le changement de modèle agricole est probablement à mettre en cause. Les hypothèses avancées pour expliquer ce phénomène sont : la régression des prairies pâturées et des sansouïres, l'abattage des haies et l'utilisation de phytosanitaires.

2.4 Le projet FarmLand

2.4.1 Initiative et description du projet FarmLand

Le projet FarmLand est un programme de recherche financé par Biodiversa qui a regroupé cinq pays : l'Allemagne, l'Espagne, la France, le Royaume-Uni et le Canada. Son objectif était d'étudier si le paysage pouvait un effet positif pour la biodiversité et les services écosystémiques dans les milieux agricoles. Au total, 8 régions agricoles ont été suivies entre 2012 et 2015 (Figure 5).

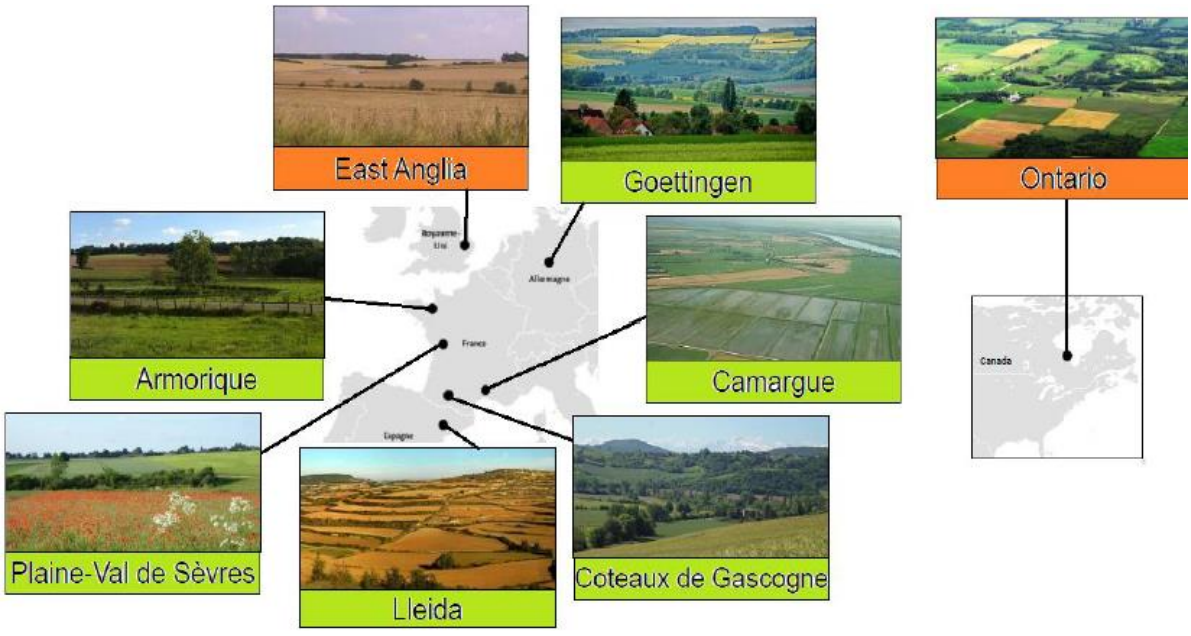


Figure 5 : Carte de localisation (d'après Sirami et al., 2013) des régions participant au programme FarmLand. En vert les régions financées par ERA-Net Biodiversa et en orange les régions autofinancées et partenaires du projet.

Dans chacune de ces régions, 40 à 100 paysages agricoles de 1 km² ont été échantillonnés. Le choix de ces paysages s'est fait grâce à des analyses de télédétection de

manière à représenter au mieux la diversité de paysages agricoles des différentes régions. Le choix de ces paysages est réalisé selon deux gradients : la diversité des cultures (indice de diversité de Shannon) et la configuration des cultures (taille moyenne des parcelles).

Des échantillonnages de biodiversité ont été réalisés, dans deux à quatre parcelles de chaque unité paysagère. Les points d'échantillonnages sont restés les mêmes tout au long du projet. Sept taxons ont été étudiés : les oiseaux, les plantes, les papillons, les abeilles, les syrphes, les carabes et enfin les araignées. En parallèle, l'ensemble des pratiques culturales de chaque parcelle a été répertorié et la structure paysagère des différents carrés décrite.

2.4.2 Le projet FarmLand en Camargue

En Camargue, les sept taxons cités précédemment ont été échantillonnés sur 41 paysages pendant l'année 2013 (Figure 6).

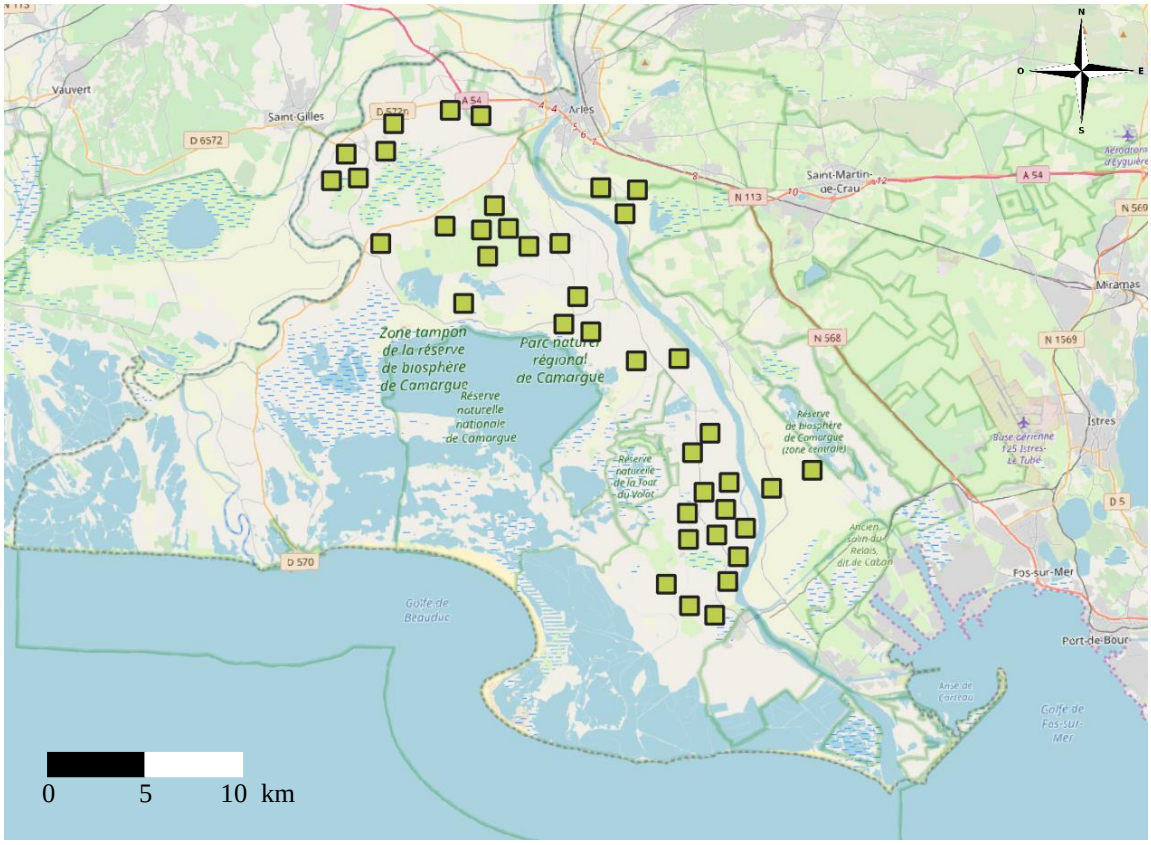


Figure 6 : Carte des paysages suivi en Camargue. Réalisé avec Qgis 3.6.0.

Lors du projet FarmLand, ce sont 159 parcelles agricoles qui ont été étudiées en Camargue. Cet échantillon est composé de 19 % de parcelles cultivées en agriculture biologique, ce qui correspond au pourcentage de SAU biologique totale en Camargue.

La majorité des parcelles étudiées étaient implantées en riz ou en blé dur. Le riz a été étudié car c'est la culture majoritaire en Camargue et elle fait la particularité de ce territoire. Le blé dur lui, en plus de sa place importante dans la rotation, permet d'avoir une culture comparable entre les huit régions qui ont participé au projet FarmLand.

Les données du projet Farmland ont été jusqu'à présent utilisées afin d'étudier l'impact du paysage et de la taille des parcelles sur la biodiversité en milieux agricole dans les différentes régions où s'est déroulée l'étude (Fahrig et al. 2015; Bertrand et al. 2016b, a; Sirami et al. 2019). Cependant, aucune ne s'est faite en particulier sur le jeu de données de Camargue et aucune ne s'est intéressée aux effets de l'utilisations de PPP sur la biodiversité.

3 Objectifs et problématique du stage

3.1 Objectifs et question de recherche

Localement, il existe une volonté des différents acteurs du monde agricole de développer l'agro-écologie pour répondre aux enjeux qui se posent aujourd'hui dans les systèmes agricoles camarguais. L'objectif général de ce travail est donc de mieux comprendre les relations entre agriculture et biodiversité et de contribuer au développement de recommandations pour une gestion agro-écologique des systèmes rizicoles.
L'objectif spécifique ici sera d'évaluer l'intérêt des cultures de riz et de blé pour les différentes espèces d'oiseaux en Camargue et d'identifier les impacts de l'usage des produits phytopharmaceutiques sur ce groupe dans les paysages rizicoles camarguais.

3.2 Hypothèses

Les hypothèses testées sont les suivantes : (i) les parcelles cultivées en riz abritent une diversité, une richesse spécifique et une abondance plus importante que les parcelles cultivées en blé dur ; (ii) l'usage des PPP a un effet négatif sur la diversité, la richesse spécifique et l'abondance des oiseaux camarguais dans les parcelles agricoles ; et (iii) cette réduction de biodiversité dans les parcelles traitées peut être atténuée par un paysage complexe.

4 Matériel et méthodes

4.1 Parcelles agricoles

Dans chaque paysage, quatre parcelles agricoles ont été suivies. Pour chacune des parcelles, différentes catégories de variables ont été recueillies comme les opérations culturales : traitements réalisés, date de mise en eau… ; des données morphologiques : emplacement, surface ; des données de productions : rendement. Ces opérations culturales ont été relevées lors d'entretiens directifs avec les différents agriculteurs. Pour certaines, parcelles les données sont incomplètes.

Concernant les traitements réalisés, certains exploitants n'ont pas souhaité indiquer les produits utilisés ou les doses appliquées par produit. Ces exploitations ont donc été écartées des analyses. Au final, ce sont 67 parcelles cultivées en riz et 29 parcelles en blé dur réparties sur 32 paysages qui ont été analysées.

L'utilisation des PPP pour chaque parcelle a été caractérisée par l'indice de fréquence de traitements phytosanitaires (IFT). Cet indice permet de réaliser un gradient d'intensité de traitement phytosanitaire. La première étape est de calculer les IFT pour chacun des types de produits : herbicides, fongicides et insecticides par parcelle. Ce calcul se fait grâce à la formule suivante :

$$\text{IFT} = \frac{\sum(Dose\ appliquée * Surface\ traitée)}{Dose\ homologuée\ minimale * Surface\ de\ la\ parcelle}$$

Les doses homologuées ont été récupérées sur le portail E-phy de l'anses (https://ephy.anses.fr). Pour les semences qui ont été traitées par enrobage, un IFT semence de 1 est attribué à la parcelle. Ensuite, chacun de ces IFT par type est sommé ainsi que l'IFT semence pour obtenir l'IFT total de la parcelle. C'est cet IFT total qui a été utilisé pour les analyses. Sur les parcelles cultivées en riz dans l'échantillon sélectionné, seuls des herbicides ont été appliqués. L'IFT total dans le cas du riz n'est constitué que par l'IFT herbicides et semence.

4.2 Paysage

Les paysages étudiés au cours de l'année 2013 ont été sélectionnés grâce à la carte d'occupation du sol de 2011 fournie par le Parc Naturel Régional de Camargue (PNRC).
Les paysages correspondent à des carrés de 1 km x 1 km dont la production agricole (cultures et prairies ayant ≥ 60% de leur biomasse exportée) représentait entre 60 et 90% de la superficie.

Les centroïdes de chaque carré étaient séparés d'au moins 1,5 km. Au sein de chaque paysage, 4 points d'échantillonnage ont été sélectionnés en respectant les contraintes fixées par le protocole FarmLand. Chaque point devait être situé :

- En bordure, entre deux parcelles (prairie ou culture, les jachères exclues).
- À une distance d'au moins 100 m de la limite du paysage et de 50 m d'une zone non agricole (route, bosquets, marais, etc.)
- À une distance d'au moins 200 m des autres points d'échantillonnages

Les bordures sur lesquelles étaient positionnées les points d'échantillonnages ont été classées en quatre catégories : les fossés avec une bande à Roseaux communs (*Phragmites australis*) et ceux avec une bande de Canne de Provence (*Arundo donax*) liée à la présence de canaux d'irrigation et de drainage, les bandes enherbées et les haies.

Les paysages de 1 km sur 1 km des agrosystèmes où ont eu lieu les relevés de biodiversité ont été caractérisés par quatre variables. La première était, l'indice de Shannon de la diversité des milieux semi-naturels, qui se calcule de la manière suivante : $\mathbf{Hsemi-nat'} = -\mathbf{\Sigma} \boldsymbol{pi} * \mathbf{log}(\boldsymbol{pi})$ pour i allant de 1 à S le nombre de milieux semi-naturels (forêts, milieux humides, prairies) et p_i la proportion de chacun de ces milieux dans le paysage. Cet indice est approprié à l'étude car il donne de l'importance aux éléments rares. Or, des milieux de petites surfaces (arbres isolés, bosquets…) peuvent servir de zones refuges. Ce premier indice a été utilisé dans plusieurs études qui cherchaient à étudier les relations entre la biodiversité aviaire et les milieux agricoles (Fahrig et al. 2011; Jeliazkov et al. 2016).

Une seconde variable utilisée est l'indice de Shannon de la diversité culturale, qui permet de refléter l'intensité de polyculture d'un paysage. Dans un paysage avec de nombreuses cultures différentes, l'indice de Shannon de diversité culturale sera élevé. Cet indice a lui aussi été utilisé dans les études citées précédemment.

Les deux autres indices sont la taille moyenne des parcelles agricoles d'un même paysage et la somme des surfaces réelles des infrastructures agroécologiques du paysage : haies et bandes enherbées. Ces variables permettent de caractériser les bordures des parcelles agricoles. Elles ont été utilisées dans une étude réalisée sur l'ensemble des données du projet Farmland par Sirami et al. (2019).

4.3 Suivi ornithologique

Les oiseaux ont été échantillonnés par des points d'écoute de 10 minutes. Ces points étaient situés au milieu d'un des côtés de la parcelle et ont été répétés deux fois pour les parcelles de blé dur entre la mi-avril et la mi-mai et une fois pour les parcelles de riz à la mi-juin. Différentes informations ont été relevées : distance de contact, comportement, … Pour répondre à la question de recherche, il est important de ne conserver que les espèces qui utilisent les parcelles agricoles pour s'alimenter ou pour se reproduire, ou les deux. Les oiseaux vus en vol et/ou contactés à une distance de plus de 100 mètres ont donc été retirés des analyses car ces données ne permettent pas d'affirmer que ces individus utilisent réellement le milieu étudié.

Pour caractériser la biodiversité aviaire, les variables réponses suivantes ont été choisies : l'indice de Shannon, la richesse spécifique et l'abondance. L'abondance décrit le nombre total d'individus observés sur une parcelle donnée lors des suivis et la richesse spécifique compte le nombre d'espèces différentes observées. L'indice de Shannon permet d'étudier la diversité d'une communauté (Shannon 1948) et se calcule de la manière suivante :

$$\boldsymbol{H' = -\Sigma \frac{ni}{N} * \log(\frac{ni}{N})}$$, pour i allant de 1 à S

Avec :

ni : le nombre d'individus de l'espèce i, i allant de 1 à S (le nombre total d'espèces).

N : le nombre total d'individus.

L'indice H' est positif et prend des valeurs entre 0 et l'infini. Un indice de Shannon nul signifie que tous les individus du milieu d'étude appartiennent à la même espèce. L'indice prend aussi une valeur faible lorsqu'un taxon est fortement dominant par rapport à tous les autres. H' est maximal quand les individus sont répartis équitablement entre chaque espèce.

4.4 Traitement des données

Des analyses préliminaires ont été réalisées pour comparer la diversité et la richesse des oiseaux entre les parcelles en blé et en riz en utilisant des tests de Student et leur abondance en utilisant des tests non paramétriques de Wilcoxon-Mann-Whitney du fait de la non-normalité de ces données.

L'impact des variables paysagères et des traitements phytosanitaires sur la diversité, la richesse et l'abondance des oiseaux a ensuite été analysé grâce à des modèles à effets mixtes (R package {nlme}, Pinheiro et al. 2014). L'effet aléatoire permet de prendre en compte la contrainte de l'emboîtement des données (plusieurs relevés pour une même parcelle) et de la dépendance

spatiale des sites de suivis (les parcelles au sein d'un même paysage). Ici, ce sont les paysages qui sont considérés comme une variable aléatoire. Le paysage peut en effet avoir un effet sur les différentes variables de biodiversité puisque l'on peut faire l'hypothèse que la diversité béta (différence de diversité entre deux éléments (Burel et al. 2008)) entre les paysages est importante. Les effets fixes sont eux les différentes variables explicatives choisies. Ces variables ont été standardisées par soustraction de la moyenne et division par le double de l'écart type grâce à la fonction *rescale* du package « arm » du logiciel R. Le modèle global s'écrit de la manière suivante :

*lme(Shannon ~ Div_milieux_semi-nat + Div_culturale + Taille_parcelles + Surfaces_IAE + IFT_total + Div_culturale * Div_milieux_semi-nat + IFT_total * Surfaces_IAE + IFT_total * Surfaces_IAE, random = ~1 | Landscape, data = Landscape_field_rice_var)*

Comme il est largement utilisé pour la sélection de modèles dans les études en écologie (Symonds and Moussalli 2010), les modèles ont été choisis grâce au critère d'information d'Akaike corrigé (AICc) pour les échantillons de petites tailles. Les modèles compris dans un delta d'AICc de 2 par rapport au meilleur modèle sont considérés comme aussi bons que le meilleur modèle pour expliquer les variations de la variable réponse (Richards 2005). Lorsque plusieurs modèles sont retenus, une moyenne pondérée des estimations de ces modèles est réalisée (Buckland et al. 2006). La fonction *model.avg* du package « MuMin » est utilisée pour effectuer cette moyenne.

Toutes les analyses sont réalisées avec le logiciel R 3.5.3.

5 Résultats

5.1 Comparaison des niveaux de biodiversité entre riz et blé dur

L'IFT moyen du riz sur l'ensemble des parcelles cultivées de manière conventionnelle dans l'échantillon étudié est de 3,4 ± 1,1 avec seulement des traitements herbicides et des traitements de semences, alors que l'IFT moyen du blé dur est de 2,9 ± 1,2 (Figure 7).

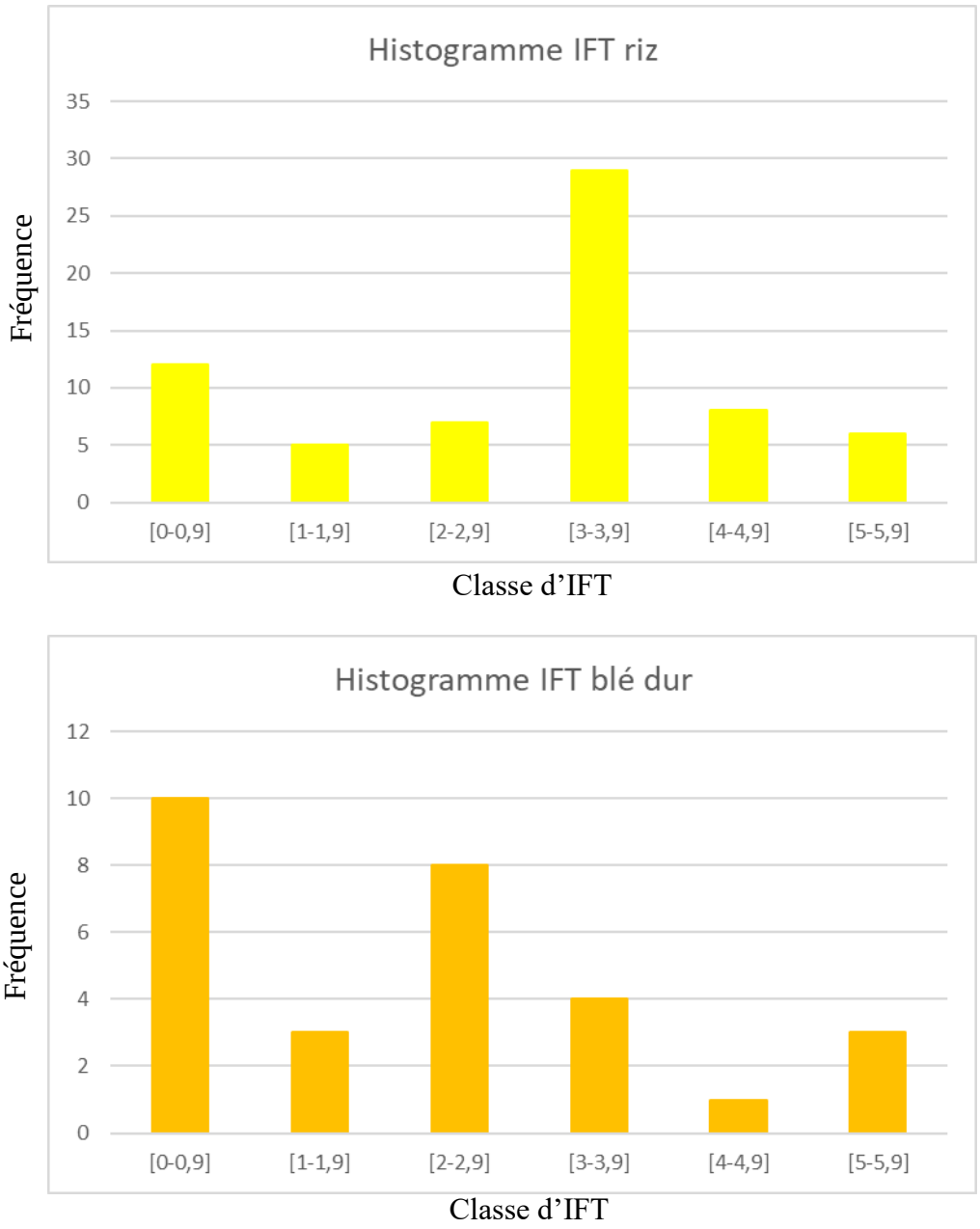


Figure 7 : En haut, histogramme du nombre de parcelles de riz par valeur d'IFT. En bas, histogramme du nombre de parcelles de blé dur par valeur d'IFT.

Dans l'échantillon étudié, 12 parcelles de riz sont cultivées sans aucun traitement phytosanitaire et sous le cahier des charges de l'agriculture biologique (Figure 7 en haut, IFT =0) soit 18 % des parcelles de riz. Pour le blé dur, 10 parcelles sont cultivées sans utilisation de PPP (Figure 7 en baste, IFT =0) soit 35 % des parcelles de l'échantillon.

Au total, 44 espèces d'oiseaux ont été observées dans les 29 parcelles de blé dur et 51 dans les 67 parcelles de riz (Tableau 2). En moyenne, la diversité et la richesse spécifiques sont plus faibles dans les parcelles cultivées en riz, mais l'abondance des oiseaux y est plus forte (Tableau 1). Cependant, malgré une richesse moyenne plus faible, 15 espèces d'oiseaux sont spécifiques à la culture du riz contre 8 pour le blé dur (Annexe 2). De plus, sur ces 15 espèces 6 sont considérées comme menacées en région Provence-Alpes-Côte-D'azur par l'IUCN (Annexe 1).

Métriques de biodiversité	Riz (N = 67)	Blé dur (N = 29)	Valeur des tests	p valeur
Shannon	1,34	1,79	t = -5,4	5,53 e-07
Abondance	62,48	57	W = 619,5	5,03 e-03
Richesse	7,16	9,9	t = -5,0	5,59 e-06

Tableau 1 : Tableau comparatif des moyennes des différentes métriques de diversité entre les parcelles de riz et de blé dur avec leur significativité. N représente le nombre de parcelles pour chaque culture.

Espèces du riz	**Régime alimentaire - en période de reproduction**	**Proies préférées**	**Habitat**	**Présence en Camargue**
Grande aigrette	Carnivore	Poissons et amphibiens	Phragmitaie	Permanente
Heron cendre	Carnivore	Poissons et amphibiens	Phragmitaie	Permanente
Heron pourpre	Carnivore	Poissons et amphibiens	Phragmitaie	Mars-Septembre
Butor étoilé	Carnivore	Poissons et amphibiens	Phragmitaie	Permanente
Aigrette garzette	Carnivore	Poissons et amphibiens	Boisements	Permanente
Goéland leucophée	Carnivore	Poissons	Ilots	Permanente
Flamant rose	Carnivore	Crevette	Ilots	Mars-Octobre
Buse variable	Carnivore	Micromammifères	Boisements	Permanente
Faucon crécerelle	Carnivore	Micromammifères	Bâtiments	Permanente
Milan noir	Carnivore	Micromammifères	Boisements	Février-Août
Mouette rieuse	Carnivore	Proies terrestres	Zone humide	Permanente
Heron garde bœufs	Carnivore et Insectivore	Proies terrestres	Boisements	Permanente
Chardonneret élégant	Granivore	Graines plantes terrestres	Boisements	Permanente
Pigeon biset	Granivore	Graines plantes terrestres	Bâtiments	Permanente
Pigeon ramier	Granivore	Graines plantes terrestres	Boisements	Permanente
Cochevis huppé	Granivore	Graines plantes terrestres	Prairies	Permanente
Tourterelle turque	Granivore	Graines plantes terrestres	Boisements	Permanente
Canard colvert	Granivore	Graines plantes aquatiques	Zone humide	Permanente
Bihoreau gris	Granivore et Insectivores	Poissons et amphibiens	Boisements humides ou secs	Mars-Octobre

Moineau friquet	Granivore et Insectivores	Graines plantes terrestres	Boisements	Permanente
Bruant proyer	Granivore et Insectivores	Graines et insectes terrestres	Boisements	Permanente
Moineau domestique	Granivore et Insectivores	Graines et insectes terrestres	Bâtiments	Permanente
Faisan de Colchide	Granivore et Insectivores	Graines et insectes terrestres	Prairies	Permanente
Rousserolle turdoïde	Insectivore	Insectes et larves aquatiques	Phragmitaie inondée	Avril-Septembre
Rousserolle effarvatte	Insectivore	Insectes et larves aquatiques	Phragmitaie inondée	Avril-Septembre
Echasse blanche	Insectivores	Insectes aquatiques	Ilots	Mars-Octobre
Bouscarle de Cetti	Insectivore	Insectes aquatiques	Phragmitaie inondée	Permanente
Cisticole des joncs	Insectivore	Insectes aquatiques	Phragmitaie inondée	Permanente
Ibis falcinelle	Insectivores	Insectes aquatiques	Boisements humide	Mars-Septembre
Chevalier culblanc	Insectivores	Insectes aquatiques	Boisements	Permanente
Mouette mélanocéphale	Insectivores	Insectes terrestres et aquatiques	Ilots	Février-Octobre
Bergeronnette printanière	Insectivores	Insectes terrestres et aquatiques	Prairies sèches et humides	Mars-Octobre
Alouette des champs	Insectivore	Insectes terrestres	Prairies	Février-Octobre
Martinet noir	Insectivore	Insectes terrestres	Bâtiments	Mars-Août
Grimpereau des jardins	Insectivore	Insectes terrestres	Boisements	Permanente
Hypolaïs polyglotte	Insectivores	Insectes terrestres	Boisements	Mai-Septembre
Hirondelle rustique	Insectivores	Insectes terrestres	Bâtiments	Février-Novembre
Rossignol philomèle	Insectivores	Insectes terrestres	Boisements	Avril-Octobre
Guêpier d'Europe	Insectivores	Insectes terrestres	Berges	Mars-Septembre
Pic vert	Insectivores	Insectes terrestres	Bois	Permanente
Étourneau sansonnet	Insectivores	Insectes terrestres	Bois	Permanente
Fauvette à tête noire	Insectivores	Insectes terrestres	Boisements	Permanente
Vanneau huppé	Insectivores	Insectes terrestres	Prairies	Février-Novembre
Coucou gris	Insectivores	Chenilles	Boisements	Mars-Septembre
Loriot d'Europe	Insectivores	Chenilles	Bois	Avril-Août
Mésange charbonnière	Insectivores	Chenilles	Bois	Permanente
Gallinule poule d eau	Omnivore	Graines et insectes aquatique	Phragmitaie inondée	Permanente
Corneille noire	Omnivore	Graines et insectes terrestres	Boisements	Permanente
Choucas des tours	Omnivore	Insectes terrestres	Bâtiments	Permanente
Pic épeiche	Omnivore	Insectes terrestres	Boisements	Permanente
Pie bavarde	Omnivore	Insectes terrestres	Boisements	Permanente

Espèces du blé dur	Régime alimentaire - en reproduction	Proies préférées	Habitat	Présence en Camargue
Épervier d'Europe	Carnivore	Oiseaux	Bois	Février-Novembre
Buse variable	Carnivore	Micromammifères	Boisements	Permanente
Faucon crécerelle	Carnivore	Micromammifères	Bâtiments	Permanente
Aigrette garzette	Carnivore	Poissons et amphibiens	Boisements	Permanente
Goéland leucophée	Carnivore	Poissons	Ilots	Permanente
Grand Cormoran	Carnivore	Poissons	Boisements humide	Septembre-Avril
Tadorne de Belon	Carnivore	Mollusques	Ilots	Permanente
Chevalier aboyeur	Carnivore et insectivore	Insectes aquatiques	Zone humide	Avril et Août
Canard colvert	Granivore	Graines plantes aquatiques	Zone humide	Permanente
Chardonneret élégant	Granivore	Graines plantes terrestres	Boisements	Permanente
Pigeon ramier	Granivore	Graines plantes terrestres	Boisements	Permanente
Cochevis huppé	Granivore	Graines plantes terrestres	Prairies	Permanente
Tourterelle turque	Granivore	Graines plantes terrestres	Boisements	Permanente
Bruant proyer	Granivore et Insectivores	Graines et insectes terrestres	Boisements	Permanente
Moineau domestique	Granivore et Insectivores	Graines et insectes terrestres	Bâtiments	Permanente
Faisan de Colchide	Granivore et Insectivores	Graines et insectes terrestres	Prairies	Permanente
Rousserolle turdoïde	Insectivore	Insectes et larves aquatiques	Phragmitaie inondée	Avril-Septembre
Rousserolle effarvatte	Insectivore	Insectes et larves aquatiques	Phragmitaie inondée	Avril-Septembre
Bouscarle de Cetti	Insectivore	Insectes aquatiques	Phragmitaie inondée	Permanente
Cisticole des joncs	Insectivore	Insectes aquatiques	Phragmitaie inondée	Permanente
Chevalier sylvain	Insectivores	Insectes aquatiques	Zone humide	Avril et Août
Mouette mélanocéphale	Insectivores	Insectes terrestres et aquatiques	Ilots	Février-Octobre
Bergeronnette printanière	Insectivores	Insectes terrestres et aquatiques	Prairies sèches et humides	Mars-Octobre
Alouette des champs	Insectivore	Insectes terrestres	Prairies	Février-Octobre
Martinet noir	Insectivore	Insectes terrestres	Bâtiments	Mars-Août
Grimpereau des jardins	Insectivore	Insectes terrestres	Boisements	Permanente
Gobemouche noir	Insectivores	Insectes terrestres	Boisements	Mars-Avril et Août-Octobre
Hypolaïs polyglotte	Insectivores	Insectes terrestres	Boisements	Mai-Septembre
Hirondelle rustique	Insectivores	Insectes terrestres	Bâtiments	Février-Novembre
Rossignol philomèle	Insectivores	Insectes terrestres	Boisements	Avril-Octobre
Guêpier d'Europe	Insectivores	Insectes terrestres	Berges	Mars-Septembre
Pic vert	Insectivores	Insectes terrestres	Bois	Permanente

Tarier des prés	Insectivores	Insectes terrestres	Prairies	Avril et Septembre
Étourneau sansonnet	Insectivores	Insectes terrestres	Bois	Permanente
Fauvette à tête noire	Insectivores	Insectes terrestres	Boisements	Permanente
Merle noir	Insectivores	Insectes terrestres	Boisements	Permanente
Vanneau huppé	Insectivores	Insectes terrestres	Prairies	Février-Novembre
Coucou gris	Insectivores	Chenilles	Boisements	Mars-Septembre
Loriot d'Europe	Insectivores	Chenilles	Bois	Avril-Août
Mésange charbonnière	Insectivores	Chenilles	Bois	Permanente
Moineau friquet	Insectivores et Granivore	Graines plantes terrestres	Boisements	Permanente
Corneille noire	Omnivore	Graines et insectes terrestres	Boisements	Permanente
Choucas des tours	Omnivore	Insectes terrestres	Bâtiments	Permanente
Pie bavarde	Omnivore	Insectes terrestres	Boisements	Permanente

Tableau 2 : En haut, tableau des espèces d'oiseaux présentent dans les parcelles de riz. En bas, tableau des espèces d'oiseaux présentent dans les parcelles de blé dur.

5.2 Effet des traitements phytopharmaceutiques sur les oiseaux et interaction avec le paysage

5.2.1 Description des paysages étudiés

Les 96 parcelles étudiées se situent dans 32 paysages différents. Les gammes de valeurs des variables qui décrivent ces paysages sont présentés dans le Tableau 3 suivant :

Facteur	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Taille_parcelles (en ha)	2,1	0,5	1,3	3,7
Surfaces_IAE (en ha)	9,3	2,4	4,7	14,4
Div_culturale	0,7	0,3	0,2	1,4
Div_milieux_semi-nat	0,3	0,2	0	0,7

Tableau 3 : Description des variables caractérisant les 32 paysages étudiés avec Taille_parcelles, la moyenne de la surface de toutes les parcelles du paysage ; Surface_IAE, la somme totale des IAE présentent dans le paysage ; Div_culturale, l'indice de Shannon de la diversité culturale ; et Div_milieux_semi-nat, l'indice de Shannon de la diversité des milieux semi-naturels.

5.2.2 Diversité des oiseaux

Pour la culture de riz, quatre modèles compris dans un delta d'AICc de 2 points expliquent les variations de l'indice de Shannon (Annexe 3). Les résultats de la moyenne de ces modèles sont donnés dans le Tableau 4.

Facteur	Estimation	Ecart-type	p valeur
Div_milieux_semi-nat	0,189	0,127	0,15

Div_culturale	-0,082	0,129	0,54
Div_milieux_semi-nat :Div_culturale	-0,204	0,327	0,55

Tableau 4 : Moyenne pondérée par le poids d'AIC de l'indice de Shannon des parcelles de riz des modèles compris dans un delta d'AIC de deux par rapport au meilleur modèle.

Une forte diversité de milieux semi-naturels dans le paysage semble avoir un effet positif sur la diversité des oiseaux qui fréquentent les parcelles de riz. Les p valeurs élevées associées à la diversité culturale et l'interaction entre ce facteur et la diversité de milieux semi-naturels, empêchent de conclure sur leurs possibles effets.

Concernant le blé, aucun des facteurs considérés n'est retenu dans la sélection de modèles, le modèle nul devançant de plus de trois points d'AICc le second modèle (Annexe 3).

5.2.3 Effet sur l'abondance

L'interaction entre l'IFT total et la diversité de milieux semi-naturels explique pour plus de 80 % la variance de l'abondance des oiseaux dans les parcelles de riz (Annexe 3). Il y a moins d'oiseaux dans les parcelles de riz lorsque l'IFT total augmente (β = -0.25, p valeur = 0.003) mais cet effet est atténué par la présence de milieux semi-naturels (β = 1.49, p valeur = 0.003) (*Figure 8*).

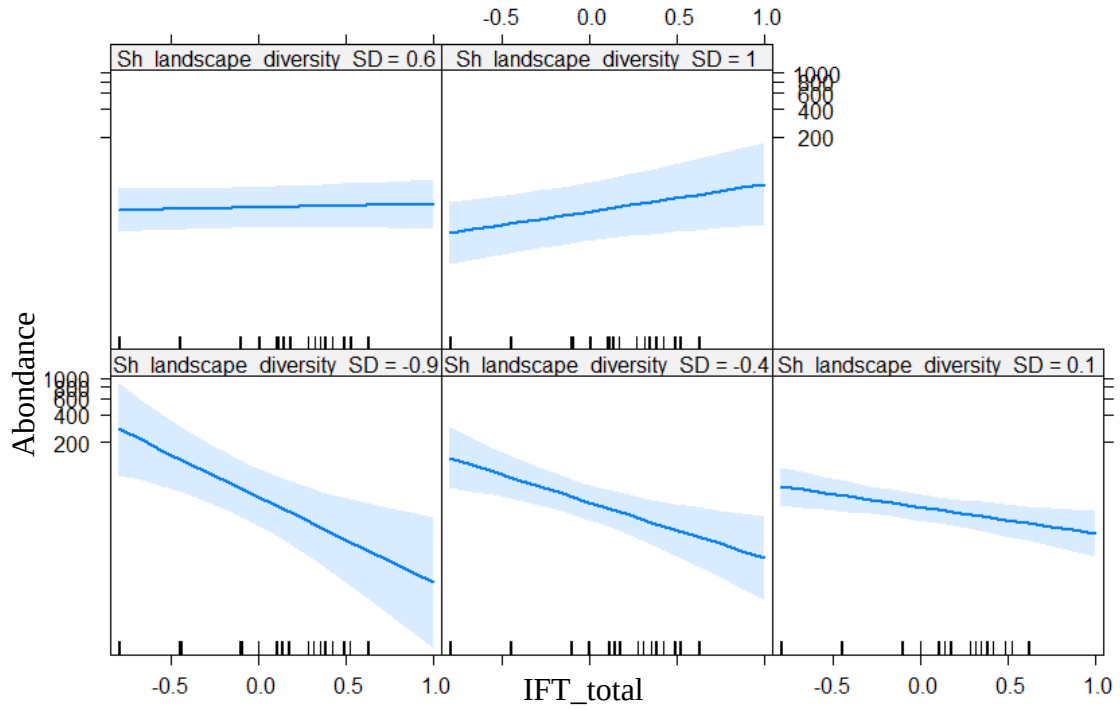


Figure 8 : Evolution de l'abondance des oiseaux dans les parcelles de riz en fonction de l'IFT total appliqué pour cinq valeurs de diversité de milieux semi-naturels différentes. Les courbes

donnent les résultats des estimations et les enveloppes qui entourent les courbes représentent l'intervalle de confiance a 95% des estimations (Fox et al. 2017).

Concernant le blé, le modèle nul et les cinq variables explicatives seules sont compris dans un delta d'AICc de 2 (Annexe 3). Les résultats de la moyenne de ces cinq modèles sont donnés dans le Tableau 5 suivant :

Facteur	Estimation	Ecart-type	p valeur
Div_milieux_semi-nat	0,245	0,266	0,37
IFT_Total	-0,146	0,221	0,52
Div_culturale	-0,146	0,301	0,64
Taille_parcelles	-0,098	0,264	0,72
Surfaces_IAE	-0,026	0,276	0,92

Tableau 5 : Moyenne pondérée par le poids d'AIC de l'abondance des oiseaux dans les parcelles de blé dur des modèles compris dans un delta d'AIC de deux par rapport au meilleur modèle.

Aucun des facteurs étudiés ne semble permettre d'expliquer la variation d'abondance des oiseaux dans les parcelles de blés.

5.2.4 Effet sur la richesse spécifique

Pour la culture de riz, trois modèles compris dans un delta d'AICc de 2 points expliquent les variations de la richesse spécifique (Annexe 3). Les résultats de la moyenne de ces modèles sont donnés dans le Tableau 6.

Facteur	Estimation	Ecart-type	p valeur
Div_milieux_semi-nat	-0,243	0,758	0,76
Surfaces_IAE	0,870	0,676	0,22
IFT_total	-1,193	0,678	0,08
IFT_total:Surfaces_IAE	0,095	1,620	0,95
IFT_total:Div_milieux_semi-nat	0,090	1,600	0,96

Tableau 6 : Moyenne pondérée par le poids d'AIC de la richesse spécifique des oiseaux dans les parcelles de riz des modèles compris dans un delta d'AIC de deux par rapport au meilleur modèle.

D'après le Tableau 6, la surface totale des IAE présentes dans le paysage semble avoir un effet positif sur la richesse spécifique. Inversement, l'IFT total semble avoir un effet négatif sur cette richesse. Les p valeurs très élevées des autres facteurs ne permettent pas de conclure quant à leurs effets possibles sur la richesse spécifique des oiseaux dans les parcelles de riz.

Concernant le blé dur, trois modèles compris dans un delta d'AICc de 2 points expliquent les variations de la richesse spécifique (Annexe 3). Les résultats de la moyenne de ces modèles sont donnés dans le Tableau 7.

Facteur	Estimation	Ecart-type	p valeur
Div_culturale	-0,248	1,418	0,87
Div_milieux_semi-nat	-0,144	1,155	0,90
Div_culturale:Div_milieux_semi-nat	-3,395	3,365	0,34
IFT_Total	-0,138	1,178	0,92
Surfaces_IAE	-0,129	1,045	0,90
Surfaces_IAE:IFT_Total	0,937	2,678	0,77
Div_milieux_semi-nat:IFT_Total	0,229	2,330	0,93

Tableau 7 : Moyenne pondérée par le poids d'AIC de la richesse spécifique des oiseaux dans les parcelles de blé dur des modèles compris dans un delta d'AIC de deux par rapport au meilleur modèle.

Aucun des facteurs étudiés ne semble permettre d'expliquer la variation de richesse spécifique des oiseaux dans les parcelles de blé dur.

6 Discussion

6.1 Comparaison riz-blé dur

Le riz est une culture de printemps qui présente la particularité d'être une culture irriguée, contrairement au blé dur qui est une culture sèche d'hiver. Les pratiques culturales de ces deux céréales sont donc assez différentes. Ces différences se retrouvent notamment au niveau des traitements phytosanitaires réalisés. Le blé dur a un IFT total moyen de 2,9 ce qui est bien en dessous de la moyenne nationale de 4,2 pour cette culture (Agreste 2016). Le riz quant à lui, a un IFT total de 3,4. Pour le riz, l'IFT herbicide des parcelles cultivées en conventionnel est de 2,8, ce qui est un point inférieur à la moyenne nationale pour ce type de produit (Agreste 2016).

Concernant les analyses de biodiversité en oiseaux, les parcelles de blé dur ont une diversité et une richesse spécifique plus importante que les parcelles de riz. Ces dernières ont en revanche une abondance d'oiseaux plus élevée, ce qui ne valide qu'en partie la première hypothèse.

Dans la liste d'espèces spécifiques au riz (Annexe 2), excepté le pic épeiche (*Dendrocopos major*) et le pigeon biset (*Columba livia*), seuls des oiseaux d'eau sont cités. Les parcelles de riz ont été échantillonnées à la mi-juin, au moment de l'émergence de la culture. Cette période de mise en eau est très favorable pour les oiseaux d'eau qui vont alors fréquenter abondamment les parcelles agricoles pour y consommer amphibiens et différents insectes et larves aquatiques (Tourenq et al. 2002). En revanche, dans la liste d'espèces spécifiques au blé dur (Annexe 2), on remarque que dans ces huit espèces d'oiseaux terrestres, certaines sont migratrices et quittent la Camargue entre avril et mai pour retrouver des zones de reproduction plus au Nord. Or, les relevés réalisés dans les parcelles de riz sont effectués à la mi-juin. La diversité et la richesse spécifique plus importante dans les parcelles de blé dur sont donc vraisemblablement un artéfact lié à la différence de date d'échantillonnage entre les deux cultures. Une analyse supplémentaire sur les oiseaux terrestres, où les espèces migratrices ne serait pas prises en comptent, est donc nécessaire pour étudier plus en détail la différence entre ces deux types de cultures.

Le blé dur est donc intéressant en Camargue car il sauvegarde la biodiversité dite commune alors qu'elle diminue très fortement dans tous les systèmes agricoles en France (AFB 2018). Les parcelles de riz quant à elles, accueillent des espèces d'oiseaux d'eau qui ont un statut de conservation défavorable tels que le butor étoilé (*Botaurus stellaris*) ou le héron pourpré (*Ardea purpurea*). Cette culture est donc importante pour la biodiversité remarquable.

Des efforts sont donc à réaliser pour proposer aux riziculteurs des solutions afin de limiter l'utilisation des herbicides. La mise en eau des parcelles pendant l'interculture pourrait limiter les stocks d'adventices grâce à leur consommation par les canards hivernants (Pernollet et al. 2016). Un agriculteur camarguais expérimente aussi sur son exploitation de la culture du riz couplé avec l'élevage de canards de barbarie qui vont consommer les adventices au cours du cycle cultural.

6.2 Impact des traitements phytosanitaires sur la biodiversité

D'après les analyses réalisées, les herbicides ont un impact négatif sur l'abondance des oiseaux qui fréquentent les rizières en Camargue (β= -0,25, p valeur = 0.003), ce qui confirme pour partie la deuxième hypothèse de l'étude.

Ce résultat renforce une série d'études qui ont mis en évidence l'impact négatif des PPP sur la biodiversité des oiseaux (Moore 1965; Parsons et al. 2010; Tesfahunegny and Mulualem 2016). Les insecticides vont par exemple avoir un effet direct de diminution de la ressource alimentaire des oiseaux insectivores (Boatman et al. 2004). Les herbicides vont quant à eux, modifier les communautés végétales dans les parcelles agricoles et en bordure (Roy et al. 2003). Ces changements de végétation modifient la ressource alimentaire des insectes herbivores et impacter les oiseaux par effet de cascade (Sipura 1999). C'est donc un contrôle « bottom-up » qui est indirectement réalisé par les herbicides sur les populations d'oiseaux. Il en est de même pour les stocks de graines d'adventices qui diminuent, grâce à l'utilisation d'herbicides et dont les oiseaux granivores se nourrissent (Gibbons et al. 2006). D'autres taxons sont aussi touchés par l'utilisation des herbicides. En Camargue, la substance active de l'herbicide Ronstar (l'oxadiazon), retiré du marché depuis 2015 (ephy.anses.fr), a été identifiée comme nocive pour une espèce d'amphibien (*Pelophylax perezi*) qui fréquente les parcelles de riz (Mesléard et al. 2016). Or, cette espèce qui domine la communauté d'amphibiens localement, fait partie du régime alimentaire des oiseaux qui fréquentent les parcelles de riz, notamment les hérons, ce qui diminue leur fréquentation. La modification des chaînes trophiques peut donc expliquer la diminution d'abondance observée.

6.3 Impact des IAE sur la biodiversité

La diversité de milieux semi-naturels dans le paysage tend à augmenter la diversité des oiseaux qui fréquentent les parcelles de riz. De la même manière, la présence d'infrastructures agroécologiques entourant les parcelles augmente la richesse spécifique dans cette culture. Concernant l'abondance des oiseaux sur les parcelles de riz, c'est l'effet d'interaction entre l'IFT herbicide et la diversité de milieux semi-naturels qui concourt à augmenter le nombre d'oiseaux observé. La réduction de biodiversité entraînée par l'utilisation de PPP peut donc être compensée par la présence d'IAE autour des parcelles, ce qui confirme la troisième hypothèse de l'étude.

Les IAE sont un levier connu pour augmenter la richesse et l'abondance des différents taxons qui fréquentent les milieux agricoles que ce soit les plantes, invertébrés et vertébrés (Schmidt et al. 2005; Roschewitz et al. 2005; Fischer et al. 2011). Ce lien s'explique par le fait que les milieux semi-naturels qui entourent les parcelles agricoles offrent des zones de reproduction et d'alimentation aux différents taxons, ce qui permet d'augmenter la taille des

populations et la richesse spéficique (Tscharntke et al. 2012). En Camargue, les IAE sont très diversifiées : haies bocagères, cannes de Provence, roseaux, et il y a aussi de nombreux milieux semi-naturels qui occupent encore une place très importante dans le territoire : marais, sansouïres, boisements.

La capacité des milieux semi-naturels à atténuer l'effet négatif des PPP sur la perte d'abondance et de diversité dans les agroécosystème a seulement été démontrée en 2015 pour les insectes pollinisateurs (Park et al. 2015). Deux hypothèses ont été avancées pour expliquer ce résultat : le fait que les milieux semi-naturels offrent (i) de meilleures ressources pour l'alimentation et la reproduction, et (ii) un refuge qui limite l'exposition directe des abeilles aux pesticides. La fourniture par les milieux semi-naturels de zones d'alimentation et de reproduction plus favorables que les parcelles agricoles peut donc expliquer le patron observé ici pour les oiseaux. Les parcelles cultivées sous le cahier des charges de l'agriculture biologique peuvent aussi servir d'habitat favorable et ainsi augmenter la richesse spécifique et l'abondance des espèces qui fréquentent les milieux agricoles (Holzschuh et al. 2008). La part de parcelles en agriculture biologique dans le paysage peut donc être un facteur à prendre en compte lors de prochaines études.

Il serait intéressant de pousser les analyses plus loin, avec un jeu de données plus large, pour savoir quels types d'IAE favorisent quels taxons, ainsi que de rechercher l'optimum de surface et de type d'IAE qui permettrait d'assurer la protection de la biodiversité et le maintien des rendements en grain des céréales.

Utiliser les milieux (semi-)naturels pour préserver la biodiversité dans les agroécosystèmes est une stratégie appelée « land sparing » (Lamb et al. 2019). Cette stratégie est connue pour permettre d'augmenter la biodiversité dans les milieux agricoles (Batáry et al. 2011; Miyashita et al. 2012; Perović and Al. 2015). Cependant, les surfaces de milieux semi-naturels dans les agroécosystèmes continuent de diminuer et l'efficacité des politiques pour maintenir ces milieux est remise en question (Batáry et al. 2015). En Camargue, la surface de milieux semi-naturels a diminuée elle aussi (Tamisier and Dehorter 1999) mais s'est stabilisée depuis les années 1990 (PNRC 2016). Ces milieux sont encore très présents dans le paysage grâce à l'acquisition d'aires protégées ou l'établissement de contrats Natura 2000 (PNRC, réserves naturelles) et grâce au maintien d'activités traditionnelles qui nécessitent de grands espaces non cultivés comme l'élevage très extensif de taureaux et la chasse au gibier d'eau sur des marais

privés. En revanche, pour ce qui est des IAE autour des parcelles agricoles, tout porte à croire que leur surface continue à diminuer comme dans le reste de la France (Pointereau 2002; Galewski, 2019, pers. comm.). Les efforts sont donc à poursuivre pour préserver les milieux semi-naturels et d'autres sont à faire pour augmenter la part des IAE dans les agroécosystèmes camarguais.

En complément du « land sparing », une stratégie de « land-sharing » va avoir pour objectif de maximiser la biodiversité dans les parcelles agricoles grâce à l'utilisation de pratiques culturales moins intensives, comme la réduction de l'utilisation de produits phytopharmaceutiques (Phalan et al. 2011). Cela permet de protéger les espèces inféodées aux milieux agricoles et peut offrir un substitut aux milieux semi-naturels, comme c'est le cas des rizières qui sont des substituts intéressants aux zones humides pour les oiseaux d'eau en période de reproduction et en hiver lorsque les rizières sont mises en eau pour la chasse (Fasola and Ruiz 1996). D'autres leviers peuvent être utilisés pour augmenter la biodiversité dans les agroécosystèmes, comme la diversification des cultures et la réduction de la taille des parcelles (Sirami et al. 2019).

Dans cette étude, les seuls résultats observés concernant l'influence des PPP ou celles des IAE sur la biodiversité le sont sur les parcelles de riz (N = 67). L'absence de tendance observée sur les parcelles de blé dur peut être due à la taille de l'échantillon (N = 29). De plus, les oiseaux sont ici le seul indicateur de biodiversité suivi. Malgré ces qualités de bio-indicateur, aucun groupe taxonomique seul ne reflète parfaitement les tendances des autres groupes (Billeter et al. 2007). Certains taxons pourraient potentiellement réagir de manière plus marquée aux pratiques agricoles réalisées et à l'environnement immédiat de la parcelle, comme les carabes (Pfiffner and Luka 2003). Une étude multi-taxons peut donc se révéler pertinente pour étudier ce type de problématique. C'est ce qu'ont par exemple fait Sirami et al. (2019) lors de leur étude sur l'impact du paysage agricole sur la biodiversité, grâce aux données récoltées dans le cadre du programme Farmland.

7 Conclusion

Les PPP ont donc un effet néfaste sur la richesse spécifique des oiseaux dans les parcelles de riz camarguaises tandis que la présence de milieux semi-naturels et d'IAE ont un effet positif sur la diversité et la richesse spécifique. De plus, les parcelles implantées dans des paysages avec une forte proportion de milieux semi-naturels vont garder une abondance en oiseaux élevée. Les IAE et les milieux semi-naturels semblent donc être des atouts pour la biodiversité des agroécosystèmes et compenser en partie l'impact des PPP. Continuer les recherches dans cette voie permettrait de préciser notamment quelles IAE sont à favoriser et en quelle proportion. Les agriculteurs pourront ainsi par la suite installer ces IAE eux-mêmes ou en partenariat avec des structures locales comme la Tour du Valat ou le PNRC en Camargue par exemple. Des analyses supplémentaires sur les liens entre ces IAE et les rendements permettraient aussi de donner plus d'informations aux agriculteurs.

Lors d'études sur des organismes dans leur milieu, les protocoles sont toujours à réfléchir en lien avec leur biologie. Sur les oiseaux, les dates d'échantillonnages sont par exemple un point très important à prendre en compte à cause du caractère migrateur de certaines espèces. Ce sont aussi des organismes très mobiles. Un nombre d'échantillonnages trop faible peut donc apporter des biais comme la non détection des espèces cryptiques ou l'absence de certaines espèces dans lors de relevés par le simple fait du hasard. Un travail multi-taxons permettrait d'atténuer ces effets dus au hasard, ce qui aurait pour conséquence de consolider les résultats présentés ici et ainsi proposer des modes de gestions adaptées aux agriculteurs locaux. Ces préconisations pourront aussi être extrapolées aux autres plaines rizicoles du bassin méditerranéen comme dans le delta du Guadalquivir en Espagne, qui présente sensiblement le même contexte que la Camargue.

Bibliographie

AFB (2018) Biodiversité, les chiffres clés : édition 2018. Ministère de la transition écologique et solidaire

Agreste (2016) Enquête sur les pratiques phytosanitaires en grandes cultures 2014. Ministère de l'agriculture et de l'alimentation

Andersen E, Baldock D, Brouwer F, et al (2004) Developing a high nature value farming area indicator : Final report. European Environment Agency, Copenhagen

Anthelme F, Grossi J-L, Brun J-J, Didier L (2001) Consequences of green alder expansion on vegetation changes and arthropod communities removal in the northern French Alps. For Ecol Manage 145:57–65.

ARVALIS - Institut du végétal (2017) Blé dur - Guide de culture

Balkiz O (2006) Dynamique de la métapopulation de Flamants roses en Méditerranée: implications pour la conservation. Thèse de doctorat. Montpellier 2

Batáry P, Dicks L, Kleijn D, Sutherland W (2015) The role of agri-environment schemes in conservation and environmental management. Conserv Biol 29:1006–1016

Batáry P, Fischer J, Báldi A, et al (2011) Does habitat heterogeneity increase farmland biodiversity? Front Ecol Env 9:152–153

Bertrand C, Baudry J, Burel F (2016a) Seasonal variation in the effect of landscape structure on ground-dwelling arthropods and biological control potential. Basic Appl Ecol 17:678–687.

Bertrand C, Burel F, Baudry J (2016b) Spatial and temporal heterogeneity of the crop mosaic influences carabid beetles in agricultural landscapes. Landsc Ecol 31:451–466.

Billeter R, Liira J, Bailey D, et al (2007) Indicators for biodiversity in agricultural landscapes: a pan-European study. J Appl Ecol 45:141–150.

BirdLife International (2013) Birds are very useful indicators for other kinds of biodiversity. http://www.birdlife.org. Accessed 27 Jul 2019

Blondel J, Barruol G, Vianet R (2013) L'Encyclopédie de la Camargue, 1st edn. Buchet-Chastel, Paris

Boatman ND, Brickle NW, Hart JD, et al (2004) Evidence for the indirect effects of pesticides on farmland birds. In: Ibis. John Wiley & Sons, pp 131–143

Bos D, Grigoras I, Ndiaye A (2006) Land cover and avian biodiversity in rice fields and mangroves of West Africa, 1st edn. Wetlands International, Wageningen

Boyer AG, Swearingen RE, Blaha MA, et al (2003) Seasonal variation in top-down and bottom-up processes in a grassland arthropod community. Oecologia 136:309–316.

Brogi A, Pernollet CA, Gauthier-Clerc M, Guillemain M (2015) Waterfowl foraging in winter-flooded ricefields: Any agronomic benefits for farmers? Ambio 44:793–802.

Buckland ST, Burnham KP, Augustin NH (2006) Model Selection: An Integral Part of Inference. Biometrics 53:603.

Burel F, Garnier E, Amiaud B, et al (2008) Les effets de l'agriculture sur la biodiversité, INRA. Valoriser les synergies. Expertise scientifique collective, Paris

Cassman KG (1999) Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. Proc Natl Acad Sci 96:5952–5959.

Ceballos G, Ehrlich PR, Dirzo R (2017) Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines. Proc Natl Acad Sci 114:6089–6096.

CFR (2011) Guide 2011 du désherbage. www.rizdecamargue.com. Accessed 27 Jul 2019

Chamberlain DE, Fuller RJ, Bunce RGH, et al (2000) Changes in the abundance of farmland birds in relation to the timing of agricultural intensification in England and Wales. J Appl Ecol 37:771–788.

DataBank (2016) Terres agricoles (% du territoire). https://donnees.banquemondiale.org. Accessed 12 Apr 2019

Delmotte S, Lacombe C, Couderc V, et al (2013) Freins, leviers et impacts du developpement de l'agriculture biologique en Camargue. Innov Agron 32:213–226

Donadieu P (1996) Paysages de marais, 1st edn. Jean-Pierre de Monza

Ernoul L, Mesléard F, Béchet A (2012) Diagnostic de l'échec de la contractualisation des mesures agri-environnementales pour réduire les incursions des Flamants dans les rizières de Camargue (France). VertigO 12:2–10.

Fahrig L, Baudry J, Brotons L, et al (2011) Functional landscape heterogeneity and animal biodiversity in agricultural landscapes. Ecol Lett 14:101–112.
Fahrig L, Girard J, Duro D, et al (2015) Farmlands with smaller crop fields have higher within-field biodiversity. Agric Ecosyst Environ 200:219–234.
FAO (2018) FAO Statistical databases. In: Food Agric. Organ. United Nations. http://www.fao.org. Accessed 3 Apr 2019
FAO (2019) The state of the world's biodiversity for food and agriculture. FAO Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture Assessments, Rome, p. 572
Fasola M, Ruiz X (1996) The value of rice fields as substitutes for natural wetlands for waterbirds in the mediterranean region. Colon Waterbirds 19:122–128.
Ficheux S, Olivier A, Fay R, et al (2014) Rapid response of a long-lived species to improved water and grazing management: The case of the European pond turtle (*Emys orbicularis*) in the Camargue, France. J Nat Conserv 22:342–348.
Fischer C, Thies C, Tscharntke T (2011) Small mammals in agricultural landscapes: opposing responses to farming practices and landscape complexity. Biol Conserv 144:1130–1136.
Fox J, Weisberg S, Friendly M, et al (2017) Package "effects". Effect displays for linear, generalized linear, and other models
Galewski T, Devictor V (2016) When common birds became rare: historical records shed light on long-term responses of bird communities to global change in the largest wetland of France. PLoS One 11:e0165542.
Gibbons D, Morrissey C, Mineau P (2015) A review of the direct and indirect effects of neonicotinoids and fipronil on vertebrate wildlife. Environ Sci Pollut Res 22:103–118.
Gibbons DW, Bohan DA, Rothery P, et al (2006) Weed seed resources for birds in fields with contrasting conventional and genetically modified herbicide-tolerant crops. Proc R Soc B Biol Sci 273:1921–1928.
Gibbs HK, Helkowski JH, Holloway T, et al (2005) Global Consequences of Land Use. Science (80-) 309:570–574
Green RE, Cornell SJ, Scharlemann JPW, Balmford A (2005) Farming and the Fate of Wild Nature. Science (80-) 307:550–555
Greenberg R, Bichier P, Angon AC, et al (2000) The impact of avian insectivory on arthropods and leaf damage in some Guatemalan coffee plantations. Ecology 81:1750–1755.
Guichard L, Dedieu F, Jeuffroy MH, et al (2017) Le plan Ecophyto de réduction d'usage des pesticides en France: décryptage d'un échec et raisons d'espérer. Cah. Agric. 26:1–12
Hallmann CA, Sorg M, Jongejans E, et al (2017) More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. PLoS One 12:e0185809.
Henle K, Firbank L, Watt A, et al (2008) Identifying and managing the conflicts between agriculture and biodiversity conservation in Europe — a review. Agric Ecosyst Environ 124:60–71.
Herzog F, Jeanneret P, Ammari Y, et al (2013) Measuring Farmland Biodiversity. Solutions 4:52–58
Hinsley SA, Bellamy PE (2000) The influence of hedge structure, management and landscape context on the value of hedgerows to birds: A review. J Environ Manage 60:33–49.
Hole DG, Perkins AJ, Wilson JD, et al (2005) Does organic farming benefit biodiversity? Biol. Conserv. 122:113–130
Holmes RJ, Froud-Williams RJ (2005) Post-dispersal weed seed predation by avian and non-avian predators. Agric Ecosyst Environ 105:23–27.
Holzschuh A, Steffan-Dewenter I, Tscharntke T (2008) Agricultural landscapes with organic crops support higher pollinator diversity. Oikos 117:354–361
Hooks CRR, Pandey RR, Johnson MW (2003) Impact of avian and arthropod predation on lepidopteran caterpillar densities and plant productivity in an ephemeral agroecosystem. Ecol Entomol 28:522–532.
Inra (2017) Volet "écosystèmes agricoles" de l'évaluation française des écosystèmes et des services ecosystémiques. Rapport d'étude, Inra (France)
IPCC (2014) Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
IUCN (2019) The IUCN red list of threatened species. https://www.iucnredlist.org/. Accessed 24 Jul

2019
Jeliazkov A, Mimet A, Chargé R, et al (2016) Impacts of agricultural intensication on bird communities: New insights from a multi-level and multi-facet approach of biodiversity. Ecosyst Environ 216:9–22.
Johnson AR (1997) Long-term studies and conservation of greater flamingos in the Camargue and Mediterranean. Colon Waterbirds 20:306–315.
Jones GA, Sieving KE, Jacobson SK (2005) Avian diversity and functional insectivory on north-central Florida farmlands. Wiley Online Libr 19:1234–1245
Katayama N, Osawa T, Amano T, Kusumoto Y (2015) Are both agricultural intensification and farmland abandonment threats to biodiversity? A test with bird communities in paddy-dominated landscapes. Agric Ecosyst Environ 214:21–30.
Khireddine-Medouni I, Breuillard E, Bossard C (2016) Surveillance de la mortalité par suicide des agriculteurs exploitants Premiers résultats. Institut de veille sanitaire, Saint-Maurice : Santé publique France
Lamb A, Finch T, Pearce-Higgins JW, et al (2019) The consequences of land sparing for birds in the United Kingdom. J Appl Ecol 56:1870–1881
Landis DA (2017) Designing agricultural landscapes for biodiversity-based ecosystem services. Basic Appl. Ecol. 18:1–12
Laurans Y, Rankovic A (2019) Comment enrayer l'érosion continue de la biodiversité ?
Marti CD, Hogue JG, Kochert MN (2005) Barn Owl (*Tyto alba*). birds North Am Online (A Poole, ed) Ithaca Cornell Lab Ornithol
Martínez-Eixarch M, Curcó A, Ibáñez C (2017) Effects of agri-environmental and organic rice farming on yield and macrophyte community in Mediterranean paddy fields. Paddy Water Environ 15:457–468.
Mathevet R (2004) Camargue incertaine: sciences, usages et natures. Buchet-Chastel
Mclaughlin A, Mineau P (1995) The impact of agricultural practices on biodiversity. Agric Ecosyst Environ 55:201–212
Meehan TD, Gratton C (2015) A consistent positive association between landscape simplification and insecticide use across the Midwestern US from 1997 through 2012. Environ Res Lett 10:114001–114011.
Mesléard F (2018) La faune aquatique des rizières de Camargue. In: Cardère (ed) Le riz et la Camargue. Vers des agrosystèmes durables, Educagri. pp 349–361
Mesléard F, Garnero S, Beck N, Rosecchi É (2005) Uselessness and indirect negative effects of an insecticide on rice field invertebrates. Comptes Rendus - Biol 328:955–962.
Mesléard F, Gauthier-Clerc M, Lambret P (2016) Impact of the insecticide Alphacypermetrine and herbicide Oxadiazon, used singly or in combination, on the most abundant frog in French rice fields, Pelophylax perezi. Aquat Toxicol 176:24–29.
Millennium Ecosystem Assessment (2005) Ecosystems and human well-being: biodiversity synthesis, World Reso. Washington, DC
Mittermeier RA, Myers N, Mittermeier CG, Robles Gil P (1999) Hotspots: Earth's biologically richest and most endangered terrestrial ecoregions. CEMEX, S.A., Agrupación Sierra Madre, S.C., Mexico
Miyashita T, Chishiki Y, Takagi S (2012) Landscape heterogeneity at multiple spatial scales enhances spider species richness in an agricultural landscape. Popul Ecol 54:573–281
Mols CMM, Visser ME (2002) Great tits can reduce caterpillar damage in apple orchards. J Appl Ecol 39:888–899.
Moore NW (1965) Pesticides and birds—A review of the situation in Great Britain in 1965. Bird Study 12:222–252.
Mouret J-C (2018a) Le riz et la Camargue : une coexistence nécessaire mais fragile. In: Cardère (ed) Le riz et la Camargue. Vers des agrosystèmes durables, Educagri. pp 35–54
Mouret J-C (2018b) Les exigences de la conduite d'une rizière en Camargue. In: Cardère (ed) Le riz et la Camargue. Vers des agrosystèmes durables, Educagri. pp 109–124
Oliveira Ribeiro CA, Vollaire Y, Sanchez-Chardi A, Roche H (2005) Bioaccumulation and the effects of organochlorine pesticides, PAH and heavy metals in the Eel (Anguilla anguilla) at the Camargue Nature Reserve, France. Aquat Toxicol 74:53–69.

Parc Naturel Régional de Camargue (2005) Révision de la réserve de biosphère de Camargue
Park MG, Blitzer EJ, Gibbs J, et al (2015) Negative effects of pesticides on wild bee communities can be buffered by landscape context. Proc R Soc B Biol Sci 282:.
Parsons KC, Mineau P, Renfrew RB (2010) Effects of Pesticide use in Rice Fields on Birds. Waterbirds 33:193.
Perfecto I, Vandermeer JH, Bautista GL, et al (2004) Greater predation in shaded coffee farms: the role of resident neotropical birds. Ecology 85:2677–2681.
Pernollet CA, Cavallo F, Simpson D, et al (2016) Seed density and waterfowl use of rice fields in Camargue, France. J Wildl Manage 81:96–111.
Perović D, Al. E (2015) Configurational landscape heterogeneity shapes functional community composition of grassland butterflies. J Appl Ecol 52:505–513
Pfiffner L, Luka H (2003) Effects of low-input farming systems on carabids and epigeal spiders - A paired farm approach. Basic Appl Ecol 4:117–127.
Phalan B, Onial M, Balmford A, Green RE (2011) Reconciling food production and biodiversity conservation: land sharing and land sparing compared. Science (80-) 333:1289–1293
Philpott SM, Greenberg R, Bichier P, Perfecto I (2004) Impacts of major predators on tropical agroforest arthropods: Comparisons within and across taxa. Oecologia 140:140–149.
Pimentel D (2009) Pesticides and pest control. In: Integrated Pest Management. Springer Netherlands, Dordrecht, pp 83–87
Pinheiro J, Bates D, DebRoy S, et al (2014) nlme: Linear and nonlinear mixed effects models
PNRC (2016) L'occupation du sol en Camargue, état 2016 et son évolution depuis 2001
Pointereau P (2002) Les haies, évolution du linéaire en France depuis quarante ans. Courr l'environnement l'INRA 46:69–74
Poux X, Pointereau P (2014) L'agriculture à « Haute Valeur Naturelle » en France métropolitaine. Un indicateur pour le suivi de la biodiversité et l'évaluation de la politique de développement rural. Rapport d'étude au Ministère de l'agriculture de l'agroalimentaire et de la forêt. AScA, SOLAGRO.
Rands SA, Whitney HM (2011) Field margins, foraging distances and their impacts on nesting pollinator success. PLoS One 6:e25971.
Ray DK, Ramankutty N, Mueller ND, et al (2012) Recent patterns of crop yield growth and stagnation. Nat Commun 3:1293–1300.
Richards SA (2005) Testing ecological theory using the information-theoretic approach: Examples and cautionary results. Ecology 86:2805–2814
Rodríguez J, Jr TB, Bennett E, et al (2006) Trade-offs across space, time, and ecosystem services. Ecol Soc 11:28–42
Roschewitz I, Gabriel D, Tscharntke T, Thies C (2005) The effects of landscape complexity on arable weed species diversity in organic and conventional farming. J Appl Ecol 42:873–882.
Roy DB, Bohan DA, Haughton AJ, et al (2003) Invertebrates and vegetation of field margins adjacent to crops subject to contrasting herbicide regimes in the Farm Scale Evaluations of genetically modified herbicide-tolerant crops. Philos Trans R Soc B Biol Sci 358:1879–1898.
Sarthou J-P (2016) Infrastructure agroécologique – Dictionnaire d'agroécologie. https://dicoagroecologie.fr. Accessed 22 Jul 2019
Schmidt MH, Roschewitz I, Thies C, Tscharntke T (2005) Differential effects of landscape and management on diversity and density of ground-dwelling farmland spiders. J Appl Ecol 42:281–287.
Shannon CE (1948) A Mathematical Theory of Communication. Bell Syst Tech J 27:623–656.
Sipura M (1999) Tritrophic interactions: Willows, herbivorous insects and insectivorous birds. Oecologia 121:537–545.
Sirami C, Gross N, Baillod AB, et al (2019) Increasing crop heterogeneity enhances multitrophic diversity across agricultural regions. Submitt to Proc Natl Acad Sci United States Am 1:
Steingröver EG, Geertsema W, van Wingerden WKRE (2010) Designing agricultural landscapes for natural pest control: A transdisciplinary approach in the Hoeksche Waard (The Netherlands). Landsc Ecol 25:825–838.
Suhling F, Befeld S, Häusler M, et al (2000) Effects of insecticide applications on macroinvertebrate density and biomass in rice-fields in the Rhone-delta, France. Hydrobiologia 431:69–79.

Symonds MRE, Moussalli A (2010) A brief guide to model selection, multimodel inference and model averaging in behavioural ecology using Akaike's information criterion. Behav. Ecol. Sociobiol. 65:13–21

Tamisier A, Dehorter O (1999) Camargue, canards et foulques: fonctionnement et devenir d'un prestigieux quartier d'hiver. Centre ornithologique du Gard

Terborgh J, Feeley K, Silman M, et al (2006) Vegetation dynamics of predator-free land-bridge islands. J Ecol 94:253–263.

Terborgh J, Lopez L, V PNN, et al (2001) Ecological meltdown in predator-free forest fragments. Science 294:1923–1926.

Tesfahunegny W, Mulualem G (2016) Impact of pesticides on birds from DDT to current fatality : A Literature Review. J Zool Stud 3:44–55

Tilman D, Fargione J, Wolff B, et al (2001) Forecasting agriculturally driven global environmental change. Science (80-) 292:281–284

Tourenq C, Aulagnier S, Durieux L, et al (2001) Identifying rice fields at risk from damage by the greater flamingo. J Appl Ecol 38:170–179.

Tourenq C, Benhamou S, Sadoul N, et al (2002) Effects of cropping practices on the use of rice fields by waterbirds in the Camargue, France. Agric Ecosyst Environ 95:543–549.

Tscharntke T, Tylianakis JM, Rand TA, et al (2012) Landscape moderation of biodiversity patterns and processes - eight hypotheses. Biol Rev 87:661–685.

Vassas R, Vigneron J (1980) L'aménagement hydro-agricole de la petite camargue et l'assainissement des marais de la souteyranne. Bulletin de la société languedocienne de géographie, Tome 14-Fascicules 2-3 : 267-295.

Vincent-Martin N (2007) Statut de conservation de la Glaréole à collier (*Glareola pratincola*) en Camargue: identification des facteurs limitant la reproduction. Thèse de doctorat, Ecole Pratique des Hautes Etudes

Wendt-Rasch L, Friberg-Jensen U, Woin P, Christoffersen K (2003) Effects of the pyrethroid insecticide cypermethrin on a freshwater community studied under field conditions. II. Direct and indirect effects on the species composition. Aquat Toxicol 63:373–389.

Wezel A, Bellon S, Doré T, et al (2009) Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. Agron Hortic 29:503–515.

Wezel A, Casagrande M, Celette F, et al (2014) Agroecological practices for sustainable agriculture. A review Agroecological practices for sustainable agriculture. Agron Sustain Dev 34:1–20.

Whelan CJ, Wenny DG, Marquis RJ (2008) Ecosystem services provided by birds. Ann N Y Acad Sci 1134:25–60.

Wood B. J., Fee Chung Gait (2003) A critical review of the development of rat control in Malaysian agriculture since the 1960s. Crop Prot 22:445–461

Annexes

Annexe 1 : liste IUCN des espèces nicheuses en Camargue et menacée au niveau régional

Codes IUCN pour les espèces menacées : CR : En danger critique, EN : En danger, VU : Vulnérable

Autres codes IUCN : NT : Quasi menacée, LC : Préoccupation mineure, NA : Non applicable

Ordre	Famille	Nom scientifique	Nom vernaculaire	Catégorie Liste rouge PACA	Catégorie liste rouge France
Charadriiformes	Glareolidae	*Glareola pratincola*	Glaréole à collier	CR	EN
Anseriformes	Anatidae	*Anas clypeata*	Canard souchet	CR	LC
Podicipediformes	Podicipedidae	*Podiceps nigricollis*	Grèbe à cou noir	CR	LC
Falconiformes	Accipitridae	*Circus pygargus*	Busard cendré	CR	VU
Ciconiiformes	Phoenicopteridae	*Phoenicopterus roseus*	Flamant rose	EN	EN
Gruiformes	Rallidae	*Porphyrio porphyrio*	Talève sultane	EN	EN
Charadriiformes	Laridae	*Larus genei*	Goéland railleur	EN	EN
Passeriformes	Sylviidae	*Locustella luscinioides*	Locustelle luscinioïde	EN	EN
Passeriformes	Sylviidae	*Sylvia conspicillata*	Fauvette à lunettes	EN	EN
Ciconiiformes	Ardeidae	*Ardea purpurea*	Héron pourpré	EN	LC
Charadriiformes	Haematopodidae	*Haematopus ostralegus*	Huîtrier pie	EN	LC
Charadriiformes	Charadriidae	*Vanellus vanellus*	Vanneau huppé	EN	LC
Charadriiformes	Scolopacidae	*Tringa totanus*	Chevalier gambette	EN	LC
Charadriiformes	Sternidae	*Sternula albifrons*	Sterne naine	EN	LC
Passeriformes	Emberizidae	*Emberiza schoeniclus*	Bruant des roseaux	EN	LC
Ciconiiformes	Ardeidae	*Ixobrychus minutus*	Blongios nain	EN	NT
Passeriformes	Alaudidae	*Calandrella brachydactyla*	Alouette calandrelle	EN	NT
Anseriformes	Anatidae	*Anser anser*	Oie cendrée	EN	VU
Ciconiiformes	Threskiornithidae	*Platalea leucorodia*	Spatule blanche	EN	VU
Ciconiiformes	Ardeidae	*Botaurus stellaris*	Butor étoilé	EN	VU
Charadriiformes	Sternidae	*Gelochelidon nilotica*	Sterne hansel	EN	VU
Charadriiformes	Sternidae	*Sterna sandvicensis*	Sterne caugek	EN	VU
Anseriformes	Anatidae	*Anas strepera*	Canard chipeau	VU	LC
Anseriformes	Anatidae	*Netta rufina*	Nette rousse	VU	LC
Galliformes	Phasianidae	*Alectoris rufa*	Perdrix rouge	VU	LC
Galliformes	Phasianidae	*Coturnix coturnix*	Caille des blés	VU	LC
Ciconiiformes	Ciconiidae	*Ciconia ciconia*	Cigogne blanche	VU	LC
Ciconiiformes	Phalacrocoracidae	*Phalacrocorax carbo*	Grand Cormoran	VU	LC
Charadriiformes	Recurvirostridae	*Recurvirostra avosetta*	Avocette élégante	VU	LC
Charadriiformes	Laridae	*Larus ridibundus*	Mouette rieuse	VU	LC
Charadriiformes	Laridae	*Larus melanocephalus*	Mouette mélanocéphale	VU	LC
Charadriiformes	Sternidae	*Sterna hirundo*	Sterne pierregarin	VU	LC
Passeriformes	Sylviidae	*Panurus biarmicus*	Panure à moustaches	VU	LC

Passeriformes	Alaudidae	*Galerida cristata*	Cochevis huppé	VU	LC
Passeriformes	Muscicapidae	*Saxicola torquatus*	Tarier pâtre	VU	LC
Passeriformes	Passeridae	*Petronia petronia*	Moineau soulcie	VU	LC
Passeriformes	Motacillidae	*Anthus campestris*	Pipit rousseline	VU	LC
Ciconiiformes	Threskiornithidae	*Plegadis falcinellus*	Ibis falcinelle	VU	NA
Ciconiiformes	Ardeidae	*Ardeola ralloides*	Crabier chevelu	VU	NT
Ciconiiformes	Ardeidae	*Ardea alba*	Grande Aigrette	VU	NT
Charadriiformes	Charadriidae	*Charadrius alexandrinus*	Gravelot à collier interrompu	VU	NT
Charadriiformes	Sternidae	*Chlidonias hybrida*	Guifette moustac	VU	NT
Cuculiformes	Cuculidae	*Clamator glandarius*	Coucou geai	VU	NT
Passeriformes	Sylviidae	*Acrocephalus melanopogon*	Lusciniole à moustaches	VU	NT
Passeriformes	Passeridae	*Passer montanus*	Moineau friquet	VU	NT
Falconiformes	Accipitridae	*Circus aeruginosus*	Busard des roseaux	VU	VU
Passeriformes	Sylviidae	*Acrocephalus arundinaceus*	Rousserolle turdoïde	VU	VU
Passeriformes	Muscicapidae	*Muscicapa striata*	Gobemouche gris	VU	VU
Passeriformes	Fringillidae	*Carduelis cannabina*	Linotte mélodieuse	VU	VU

Annexe 2 : Tableau espèces uniques aux parcelles de riz et de blé dur

Espèces spécifiques au riz	**Espèces spécifiques au blé dur**
Grande aigrette (*Ardea alba*)	Epervier d'Europe (*Accipiter nisus*)
Heron cendre (*Ardea cinerea*)	Gobemouche noir (*Ficedula hypoleuca*)
Heron pourpre (*Ardea purpurea*)	Grand cormoran (*Phalacrocorax carbo*)
Butor étoilé (*Botaurus stellaris*)	Tarier des près (*Saxicola rubetra*)
Heron garde bœufs (*Bubulcus ibis*)	Tadorne de Belon (*Tadorna tadorna*)
Mouette rieuse (*Chroicocephalus ridibundus*)	Chevalier sylvain (*Tringa glareola*)
Pigeon biset (*Columba livia*)	Chevalier aboyeur (*Tringa nebularia*)
Pic épeiche (*Dendrocopos major*)	Merle noir (*Turdus merula*)
Gallinule poule d'eau (*Gallinula chloropus*)	
Echasse blanche (*Himantopus himantopus*)	
Milan noir (*Milvus migrans*)	
Bihoreau gris (*Nycticorax nycticorax*)	
Flamant rose (*Phoenicopterus roseus*)	

Ibis falcinelle (*Plegadis falcinellus*)	
Chevalier cul blanc (*Tringa ochropus*)	

Annexe 3 : Tableau récapitulatif des résultats des modèles à effets mixtes

Riz : Indice de diversité de Shannon

Modèle	Facteur	Nb para	AICc	Delta AICc	Poids AICc	Pente	P valeur
Nul		1	111	0,0	0,26		
Div_culturale * Div_milieux_semi-nat	Div_culturale	3	111	0,0	0,26	1,34	0,747
	Div_milieux_semi-nat					0,23	0,292
	Interaction					-1,30	0,538
Div_milieux_semi-nat		2	112,6	1,6	0,12	0,19	0,149
Div_culturale + Div_milieux_semi-nat	Div_culturale	3	112,7	1,7	0,11	-0,18	0,508
	Div_milieux_semi-nat					0,60	0,131
Taille_parcelles		2	114,2	3,2	0,05	-0,10	0,456
IFT_total * Div_milieux_semi-nat	IFT_total	3	114,4	3,4	0,05	0,21	0,523
	Div_milieux_semi-nat					0,45	0,286
	Interaction					-0,70	0,440
Surfaces_IAE		2	114,5	3,5	0,05	-0,06	0,634
Div_culturale		2	114,6	3,6	0,04	-0,06	0,655
IFT_total		2	114,7	3,7	0,04	-0,04	0,743
IFT_total * Surfaces_IAE	IFT_total	3	119,1	8,1	0,00	0,01	0,940
	Surfaces_IAE					-0,03	0,808
	Interaction					0,46	0,157

Abondance

Modèle	Facteur	Nb para	AICc	Delta AICc	Poids AICc	Pente	P valeur
IFT_total * Div_milieux_semi-nat	IFT_total	3	3441,1	0,0	0,81	-0,25	0,003
	Div_milieux_semi-nat					-0,80	0,459
	Interaction					1,49	0,003
IFT_total * Surfaces_IAE	IFT_total	3	3445,9	4,8	0,07	-0,72	0,014
	Surfaces_IAE					0,36	0,277
	Interaction					-0,96	0,016

Div_culturale * Div_milieux_semi-nat	Div_culturale	3	3448	6,9	0,03	-0,08	0,769
	Div_milieux_semi-nat					-0,51	0,085
	Interaction					1,69	0,022
Div_milieux_semi-nat		2	3448,8	7,7	0,02	-0,46	0,147
Nul		1	3448,9	7,8	0,02		
Surfaces_IAE		2	3449,1	8,0	0,01	0,43	0,178
Taille_parcelles		2	3449,9	8,8	0,01	-0,31	0,319
IFT_total		2	3450,1	9,0	0,01	-0,13	0,382
Div_culturale		2	3450,7	9,6	0,01	-0,23	0,730
Div_culturale + Div_milieux_semi-nat	Div_culturale	3	3450,8	9,7	0,01	-0,03	0,922
	Div_milieux_semi-nat					-0,45	0,158

Richesse

Modèle	Facteur	Nb para	AICc	Delta AICc	Poids AICc	Pente	P valeur
IFT_total * Surfaces_IAE	IFT_total	3	311	0,0	0,31	-1,18	0,094
	Surfaces_IAE					0,87	0,215
	Interaction					0,10	0,953
IFT_total * Div_milieux_semi-nat	IFT_total	3	312,5	1,5	0,15	-1,21	0,098
	Div_milieux_semi-nat					-0,24	0,751
	Interaction					0,09	0,955
IFT_total + Surfaces_IAE	IFT_total	3	312,8	1,8	0,13	-1,20	0,071
	Surfaces_IAE					0,87	0,204
IFT_total		2	313,2	2,2	0,10	-1,19	0,079
Surfaces_IAE		2	313,9	2,9	0,07	0,87	0,242
Div_culturale * Div_milieux_semi-nat	Div_culturale	3	314,2	3,2	0,06	0,02	0,981
	Div_milieux_semi-nat					-0,10	0,899
	Interaction					1,50	0,456
Nul		1	314,5	3,5	0,05		
Taille_parcelles		2	314,7	3,7	0,05	-0,59	0,428
Div_milieux_semi-nat		2	315,3	4,3	0,04	-0,10	0,889
Div_culturale		2	315,3	4,3	0,04	0,10	0,893

Blé : Indice de diversité de Shannon

Modèle	Facteur	Nb para	AICc	Delta AICc	Poids AICc	Pente	P valeur
Nul		1	18,8	0,0	0,59		
Div_culturale		2	22	3,2	0,12	0,13	0,230
Div_milieux_semi-nat		2	22,9	4,1	0,08	-0,08	0,465
Taille_parcelles		2	23,2	4,4	0,07	-0,05	0,645
IFT_total		2	23,2	4,4	0,07	0,04	0,749
Surfaces_IAE		2	23,4	4,6	0,06	0,00	0,992
Div_culturale + Div_milieux_semi-nat	Div_culturale	3	26,1	7,3	0,02	0,13	0,264
	Div_milieux_semi-nat				0,00	-0,08	0,479
Div_culturale * Div_milieux_semi-nat	Div_culturale	3	27,6	8,8	0,01	0,04	0,822
	Div_milieux_semi-nat					-0,12	0,345
	Interaction					-0,31	0,424
IFT_total * Div_milieux_semi-nat	IFT_total	3	29,7	10,9	0,00	0,01	0,928
	Div_milieux_semi-nat					-0,07	0,634
	Interaction					0,08	0,772
IFT_total * Surfaces_IAE	IFT_total	3	29,9	11,1	0,00	0,04	0,743
	Surfaces_IAE					-0,01	0,965
	Interaction					0,16	0,630

Abondance

Modèle	Facteur	Nb para	AICc	Delta AICc	Poids AICc	Pente	P valeur
Nul		1	331	0,0	0,26		
Div_milieux_semi-nat		2	332,2	1,2	0,14	0,24	0,357
IFT_total		2	332,6	1,6	0,12	-0,15	0,509
Div_culturale		2	332,8	1,8	0,11	-0,15	0,629
Taille_parcelles		2	332,9	1,9	0,10	-0,10	0,711
Surfaces_IAE		2	333	2	0,10	-0,03	0,925
Div_culturale + Div_milieux_semi-nat	Div_culturale	3	333,8	2,8	0,06	-0,19	0,519
	Div_milieux_semi-nat					0,27	0,308
IFT_total * Div_milieux_semi-nat	IFT_total	3	334,9	3,9	0,04	0,10	0,735
	Div_milieux_semi-nat					0,25	0,387
	Interaction					-0,36	0,272
Div_culturale * Div_milieux_semi-nat	Div_culturale	3	334,7	3,7	0,04	-0,40	0,248
	Div_milieux_semi-nat					0,14	0,63
	Interaction					-0,91	0,285

IFT_total * Surfaces_IAE	IFT_total	3	336	5	0,02	-0,02	0,928
	Surfaces_IAE					-0,03	0,916
	Interaction					0,38	0,437

Richesse

Modèle	Facteur	Nb para	AICc	Delta AICc	Poids AICc	Pente	P valeur
Div_culturale * Div_milieux_semi-nat	Div_culturale	3	134,9	0,0	0,71	-0,25	0,864
	Div_milieux_semi-nat					-0,26	0,819
	Interaction					-3,40	0,327
IFT_total * Surfaces_IAE	IFT_total	3	136,7	1,8	0,29	-0,17	0,879
	Surfaces_IAE					-0,13	0,903
	Interaction					0,94	0,738
IFT_total * Div_milieux_semi-nat	IFT_total	3	136,9	2,0	0,26	-0,10	0,939
	Div_milieux_semi-nat					0,15	0,904
	Interaction					0,23	0,925
Div_culturale		2	138	3,1	0,15	0,72	0,480
Div_culturale + Div_milieux_semi-nat	Div_culturale	3	138,2	3,3	0,14	0,71	0,505
	Div_milieux_semi-nat					0,16	0,878
Nul		1	138,4	3,5	0,12		
IFT_total		2	138,5	3,6	0,12	-0,22	0,834
Div_milieux_semi-nat		2	138,6	3,7	0,11	0,16	0,873
Taille_parcelles		2	138,6	3,7	0,11	0,15	0,875
Surfaces_IAE		2	138,6	3,7	0,11	-0,13	0,810