



HAL
open science

Gestion intégré du socio-écosystème camarguais

Amandine Aullo

► **To cite this version:**

Amandine Aullo. Gestion intégré du socio-écosystème camarguais. Systematics, Phylogenetics and taxonomy. 2019. hal-02863289

HAL Id: hal-02863289

<https://hal.inrae.fr/hal-02863289>

Submitted on 10 Jun 2020

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

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

Université de Montpellier & Montpellier SupAgro

Master Mention « Biodiversité, Ecologie, Evolution, B2E »
Parcours « EcoSystèmeS »

Projet de recherche :

Gestion intégrée du socio-écosystème camarguais

Par

AULLO Amandine

Stage de M2

Réalisé sous l'encadrement de

Gaucherel Cédric (INRA, UMR AMAP)

Et le co-encadrement de

Geijendorffer Ilse (Tour du Valat)

Table des matières

Résumé :	3
Introduction	4
Matériels et méthodes	7
□ Site d'étude	7
□ Modèle de Pétri	9
□ Méthodologie	11
□ Analyses	11
□ Scénario	13
Résultats	13
□ Scénario de référence	13
□ Espace d'état de scénario de référence	13
□ Représentation et analyse de l'espace d'état (SR)	15
□ Scénario perturbé	15
□ Analyses des services écosystémiques dans les scénarios	15
Discussion	17
Le fonctionnement modélisé de la Camargue	17
Dynamique de la Camargue avec l'application de la perturbation	19
Trajectoires des scénarios	21
Services écosystémiques	23
□ Conclusion	24
□ Annexes	25

Résumé :

L'intégration de composantes de diverses natures (i.e écologiques, socio-économiques, abiotiques) est souvent réalisée selon des approches particulières. Les conflits socio-économiques au sein de zones naturelles constituent des cas d'étude de modélisation intégrée. Sur le site de la Camargue, zone humide méditerranéenne française, la riziculture y est prédominante, et est responsable de l'introduction d'importants volumes d'eau douce depuis le Rhône. Cette irrigation profite à l'ensemble des activités humaines : conservation des milieux emblématiques, tourisme, élevage, chasse et pêche. Une modélisation intégrée et qualitative sera appliquée à ce site afin de comprendre le fonctionnement du socio-écosystème, de ses services écosystémiques, et de répondre à ces problématiques de gestion hydrique. Se basant sur des réseaux de Petri, cet outil permet la représentation de l'ensemble des états fonctionnels de l'écosystème. En situation de référence, une résilience de l'écosystème a été observée par l'obtention d'un ensemble d'états formant une topologie stable. Avec l'application de la perturbation d'arrêt de la riziculture sur le scénario de référence, une perte drastique des milieux humides ainsi qu'une resalinisation des terres se retrouvent dans notre modèle. L'analyse des stabilités et trajectoires des socio-écosystèmes via cet outil de modélisation, offre des perspectives intéressantes pour répondre aux enjeux de gestion environnementale.

Points-clés: socio-écosystème, modèle intégré qualitatif, Camargue, gestion de l'eau, scénarios, services écosystémiques

Abstract :

The integration of components of various natures (i.e ecological, socio-economic, abiotic) is often carried out according to particular approaches. Socio-economic conflicts within natural areas are case studies of integrated modeling. On the Camargue site, a French Mediterranean wetland, rice cultivation is predominant, and is responsible for the introduction of large volumes of fresh water from the Rhône. This irrigation benefits all human activities: conservation of emblematic environments, tourism, livestock, hunting and fishing. An integrated and qualitative modeling will be applied to this site in order to understand the functioning of the socio-ecosystem, its ecosystem services, and to answer problems of water management. Based on Petri nets, this tool allows the representation of all the functional states of the ecosystem. In a reference situation, a resilience of the ecosystem has been observed by obtaining a set of states forming a stable topology. With the application of the stop disturbance of rice cultivation on the reference scenario, a drastic loss of wetlands and a resalinization of lands are found in our model. The analysis of the stabilities and trajectories of the socio-ecosystems through this modeling tool, offers interesting perspectives to answer the environmental management issues.

Key-words: socio-ecosystem, qualitative integrated model, Camargue, water management, scenarios, ecosystem services

Introduction

Depuis des décennies, l'influence croissante de la logique capitaliste sur notre relation avec la nature a mené à des problèmes environnementaux majeurs (Anderies *et al.*, 2004 ; Rockstrom *et al.*, 2009). Pour répondre à ces enjeux devenus humanitaires, les études sur le fonctionnement des écosystèmes se sont développées, mais restent insuffisantes pour appréhender complètement leurs dynamiques (Bennett *et al.*, 2015). Les écosystèmes se basent sur une multitude d'interactions entre facteurs abiotiques et composants organiques, interagissant directement ou indirectement à différentes échelles d'organisation. Le fonctionnement des écosystèmes repose ainsi sur des réseaux d'interaction hautement connectés (Schmitz, 2010). Ces interactions variables dans le temps et l'espace, associées aux flux de matières et d'énergie, complexifient grandement la compréhension du fonctionnement des écosystèmes (Frontier *et al.*, 2008). Bien que les réseaux écologiques soient aujourd'hui devenus un domaine fondamental de la recherche en écologie théorique, dans la littérature se retrouve majoritairement des réseaux spécifiques (e.g écologiques, physicochimiques, socio-économiques), déconnectés les uns des autres, où de plus, les dimensions spatiales et temporelles varient peu (Pilosof *et al.*, 2017).

Par ailleurs, les fonctionnements et empreintes anthropiques s'inscrivent dans la dynamique des écosystèmes. La co-existence entre l'humain et son environnement se joue ainsi dans l'intégration des systèmes socio-économiques au sein des systèmes écologiques. Par cette co-association viable, de la résilience pourra s'établir au sein des socio-écosystèmes (Folke et Berkes, 1998).

Bien que les socio-écosystèmes soient aujourd'hui étudiés dans diverses thématiques de recherche (Coldin et Barthel, 2019), l'intégration de l'ensemble des processus responsables du fonctionnement d'un socio-écosystème, est encore réalisée selon des approches au cas par cas et sans cadre conceptuel consensuel (Ostrom, 2009). La liaison entre les modules de différentes composantes (abiotiques, biotiques, anthropiques) peut être établie au travers des services écosystémiques (SEs), qui dépendent autant de variables écologiques que sociales (Geijzendorffer *et al.*, 2014). Définis comme les bénéfices apportés par les écosystèmes au bien être humain (MEA, 2005), les bouquets de services regroupent trois grands types de services généralement reconnus (approvisionnement, régulation et culturel). Il n'y a cependant aucune norme reconnue et chaque évaluation des services écosystémiques peut présenter des bouquets différents (EFESE, 2018). L'analyse européenne des évaluations nationales des services écosystémiques des écosystèmes, publiées avant 2016, montre que les bouquets de services varient de 6 à 28 services écosystémiques selon la classification du CICES (Schröter *et al.*, 2016).

La viabilité d'un socio-écosystème suppose une compréhension indispensable des répercussions possibles selon les mesures de gestion environnementale envisagées. Ainsi, les conséquences en termes de services écosystémiques et leur intégration dans un modèle, pourrait pallier au manque de connaissances et à l'absence de prise en compte globale de la dynamique du socio-écosystème (Heurtefeux *et al.*, 2007).

Pour comprendre la dynamique des écosystèmes sur le long terme, et dans toute leur complexité, il a été proposé d'utiliser des modèles intégrés qualitatifs provenant de l'informatique théorique et de la biologie (Blake, 2011 ; Baldan *et al.*, 2015 ; Gaucherel *et al.*, accepted in MEE, 2019). Les modèles mathématiques à base de réseaux peuvent en effet être utilisés pour étudier et décrire formellement les phénomènes écologiques, ainsi que pour comprendre comment les écosystèmes réagissent aux stress et perturbations (Dunne, 2006).

A l'aide d'un système discret à base de réseaux de Petri (Pommereau, 2010), ce type de modèle permet une représentation graphique et mathématique de l'écosystème en un réseau d'interactions qualitatif (Gaucherel *et al.*, 2017), tout en acceptant diverses natures de modules. Les composantes écosystémiques (les nœuds du graphe) indispensables au fonctionnement de l'écosystème, sont liées par des règles descriptives des processus associés (les arrêtes du graphe). Ces dernières conditionnent la présence ou l'absence des nœuds, qui sont vus comme des variables booléennes sur le long terme, et mènent à des changements successifs du système. Ce graphe, nommé espace d'état du système, capture la résilience de l'écosystème en calculant les connections entre états rencontrés par la dynamique. L'ensemble de ces états forme une structure topologique qui traduit soit des zones de stabilités, des points de basculement ou des effondrements potentiels du système (Gaucherel *et al.*, 2017). Selon différents scénarios de modélisation du réseau, l'analyse des transitions et trajectoires possibles de l'écosystème renseigne sur la durabilité des processus socio-écologiques (Lafond *et al.*, 2017 ; Cosme *et al.*, Soumis). Selon la complexité spatiale de l'écosystème à étudier, la modélisation à base de réseaux de Petri se réalise spatialement ou aspatialement.

Dans le cadre de mon stage, ce modèle qualitatif sera appliqué sur un socio-agro-écosystème, la Camargue delta du Rhône de la France. La Camargue, est l'une des plus grandes zones humides méditerranéennes (Coez *et al.*, 2016). Le régime hydrologique de la Camargue, hormis les précipitations, est essentiellement artificialisée. La riziculture, activité agricole dominante sur le territoire, est responsable de l'introduction en période estivale d'importants volumes d'eau douce depuis le fleuve du Rhône, en amont de la Camargue (Dervieux, 2005). Par l'important réseau hydrologique de canaux, cette ressource hydrique alimente les autres activités humaines : conservation de la nature, tourisme, élevage, chasse, pêche essentiellement. Le régime hydrologique étant l'une des principales variables qui influencent les fonctions écologiques, la biodiversité et les SEs d'une zone humide (Bullock et Acreman, 2003 ; Lebfèvre *et al.*, 2015), la gestion de l'eau en Camargue est sujet à débat entre les acteurs locaux (Cheiron *et al.*, 2016).

Le territoire camarguais réunit ainsi des interactions entre processus et SEs, accueille des activités anthropiques et potentiels conflits socio-écologiques, faisant de cette région un cas d'étude particulièrement adapté à l'application d'une modélisation socio-écologique intégrée. Un tel modèle devrait permettre de tester une perturbation socio-écologique afin d'en analyses sa dynamique et, plus tard, de fournir des recommandations de gestion. En particulier les spécialistes s'interrogent sur les impacts de l'arrêt des subventions pour les riziculteurs qui mènerait à la réduction drastique de l'eau douce, et à des conséquences sur les milieux naturels camarguais et les activités anthropiques.

Dans ce contexte, le projet ECOSERV 2018 - 2019 (INRA, Métaprogramme), mené conjointement par notre équipe du laboratoire AMAP à Montpellier et une équipe de chercheurs.ses de la Tour du Valat en Camargue (Geizendorffer Ilse, Trémoureux Mélanie et Boutron Olivier) a pour objectif d'étudier la résilience de l'écosystème camarguais face à un changement drastique de son régime hydrologique sur le long terme (environ 30 années). Nous avons travaillé en binôme avec la Tour du Valat qui s'est concentrée en détail sur une compréhension socio-économique détaillée de la Camargue, notamment à l'aide d'entretiens avec différentes catégories d'acteurs locaux (le Parc Naturel de Camargue, riziculteurs, chasseurs, éleveurs...).

Ainsi, l'étude détaillée des enjeux socio-écologiques de ce territoire, des SEs présents et de leurs bénéficiaires permettra de répondre aux questions et objectifs suivants : (Q1) Comment se comportent le socio-écosystème du scénario de référence et celui comprenant l'arrêt des

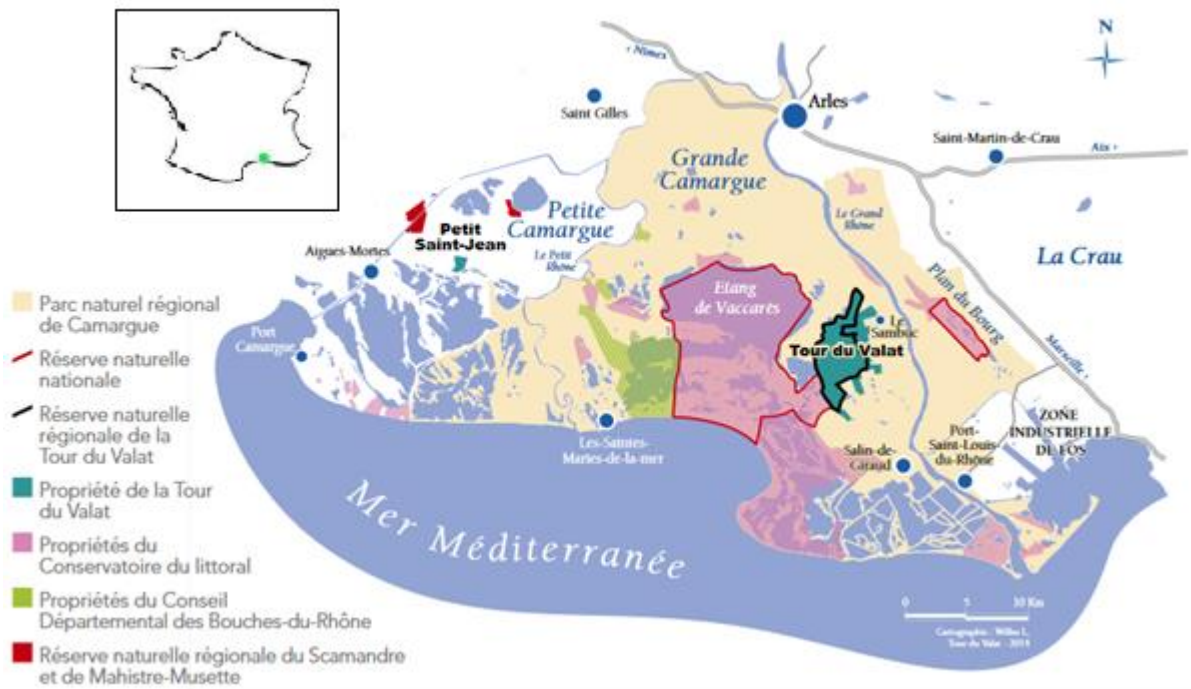


Figure 1 : Carte et localisation de la Camargue (© PNR)

subventions et la réduction de l'eau douce ? Leurs dynamiques sont-elles semblables, comment la forte réduction des apports d'eau douce affecte-t-elle la dynamique du territoire ?, (Q2) Comment interagissent les activités socio-économiques et les processus écologiques dans ces deux scénarios ?, (Q3) Comment les services écosystémiques participent-ils au maintien des activités socio-économiques en Camargue pour ces deux scénarios ?. Nous faisons l'hypothèse centrale que la perturbation (sans apports d'eau douce en amont) impactera fortement les milieux humides actuels. En conséquence, nous supposons que cela mènera à une forte resalinisation des milieux, bouleversant complètement le fonctionnement de l'écosystème.

Matériels et méthodes

▪ **Site d'étude**

Le site d'étude de la Camargue, se situe sur le littoral méditerranéen français, en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA), dans le département des Bouches-du-Rhône (Fig. 1, annexe 1). Le delta du Rhône est une 'zone humide', avec la présence de marais, de lagunes saumâtres et de végétations adaptées aux dynamiques d'assèchements et apports d'eau (Grillas et Roché, 1997). Situé sur un passage migratoire, une forte diversité d'oiseaux d'eau transite, voire se reproduit sur ce territoire. Celui-ci bénéficie d'un statut écologique d'importance régionale, nationale et mondiale (ZNIEFF, Natura 2000, convention Ramsar (1986) et l'Observatoire national des zones humides, Cheiron *et al.*, 2011). Une flore et une faune particulières s'y développent, leurs spécificités étant dues aux forts gradients abiotiques auxquels elles sont exposées (assèchement et salinité) (Cohéz *et al.*, 2016). Ce territoire abrite de nombreuses fonctions (hydrologiques, biologiques et économiques) et services écosystémiques majeurs (tels que la régulation des flux hydriques, la contribution à l'épuration des eaux, la production de ressources exportables) (Bouzillé, 2014), qui participent au fonctionnement actuel du socio-écosystème de Camargue. Une utilisation intégrée des ressources naturelles présentes constitue par conséquent une obligation pour les institutions et gestionnaires de cette région.

L'endiguement de la Camargue l'isolant des deux bras (est et ouest) du Rhône, la région se caractérise par une variabilité hydrologique fortement artificialisée. En effet, les entrées et sorties d'eau douce viennent en effet principalement des pompages du Rhône, excepté lors de ruptures de digues, ou lors de précipitations (Cohéz *et al.*, 2016). Le delta de la Camargue se comporte comme le bassin versant des étangs centraux qu'elle accueille désormais, du Rhône vers le "système Vaccarès". Cette artificialisation, associée aux variations de niveaux de salinité, font de la gestion de l'eau douce en Camargue un sujet particulièrement débattu. L'administration de l'eau douce sur le territoire, la qualité et la saisonnalité des besoins hydriques créent de fortes tensions sociales entre les activités socio-économiques présentes, telles que l'agriculture (riziculture et maraichage principalement), l'élevage (taureaux et chevaux camarguais), la chasse, la pêche, ainsi que la préservation écologique du site (Allouche *et al.*, 2015). L'introduction artificielle d'importantes quantités d'eau douce du Rhône à des fins agricoles chaque année (400 millions de m³ pour la riziculture d'avril à fin août PNRC, 2012), rompt fortement avec une variabilité 'naturelle', au cours de laquelle les zones humides seraient asséchées en période estivale. Bien que des réseaux de canaux d'irrigation et d'assainissement permettent une connectivité hydraulique sur le territoire, l'évaporation importante de l'eau douce ou saumâtre sous climat méditerranéen (Cheiron *et al.*, 2011) et la présence de nappes phréatiques salées affleurantes renforcent d'autant plus l'enjeu crucial que représente cette ressource abiotique.

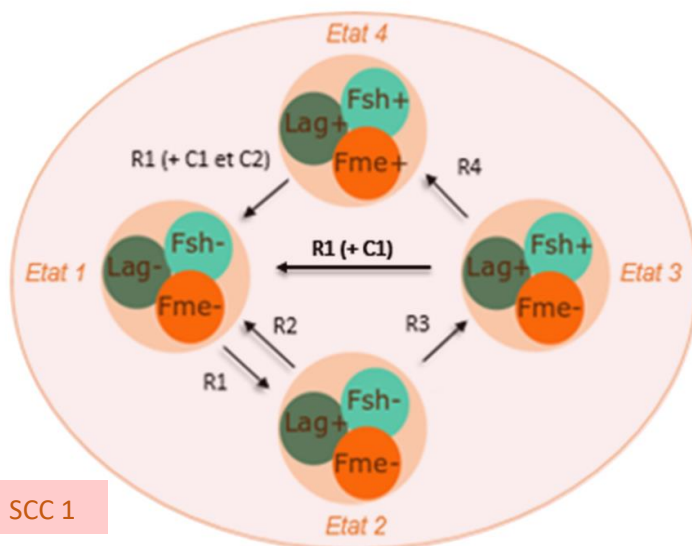
Table 1 : Un exemple simplifié de modélisation d'un processus socio-écologique, en utilisant les réseaux de Pétri, est proposé ci-dessous. Afin de modéliser le processus de pêche, trois composantes matérielles seront sélectionnées : une lagune (Lag), un stock de poisson (Fsh), et les pêcheurs (Fme). Ces trois composantes sont absentes dans l'état initial du système (Lag-, Fsh-, Fme-).

L'écriture des règles liant les trois composantes peuvent être mises en forme de la façon suivante :

Processus (i.e règles)	Commentaires
R1 : Lag+ >> Lag-	Les fortes températures estivales induisent une évaporation importante et une perte fonctionnelle de la lagune (salinisation en excès, diminution accrue d'hauteur d'eau)
R2 : Lag- >> Lag+	Les précipitations permettent un retour du milieu aquatique
R3 : Lag+ >> Fsh+	La lagune est propice aux venues de poissons migrateurs
R4 : Fsh+ >> Fme+	Les poissons attirent les pêcheurs

L'inclusion des contraintes suivantes permet d'éviter la réalisation d'états irréalistes (tels que Lag-, Fsh+, Fme+).

Contraintes	Commentaires
C1 : Lag- >> Fsh-	Sans lagune, il ne peut y avoir présence de stock de poissons
C2 : Fsh- >> Fme-	Sans la présence de poissons, la pêche ne peut être pratiquée



L'espace d'état suivant est obtenu :

L'application d'une règle dépend des conditions 'on' ou 'off' des composantes. Ainsi pour que R3 se réalise, la composante Lag doit être en 'on', indépendamment des présences ou absences fonctionnelles des autres composantes. Dans cette représentation compactée, les contraintes C1 et C2 sont appliquées implicitement.

Le caractère réversible de l'espace d'état est défini comme une zone de stabilité (= scc). La représentation en graphe compacté permet la visualisation des états 1 à 4. En graphe compacté fusionné, ce système serait représenté sous l'appellation scc 1.

Le projet de Contrat de delta Camargue a pour objectif de mettre en place cette gestion globale et partagée de l'eau dans le respect des milieux naturels (PNRC, 2012). Son avancement se heurte toutefois aux enjeux politiques, à l'identité culturelle camarguaise ainsi qu'au besoin d'anticipation des risques des crues et d'élévation du niveau marin. Notre modèle intégré de la Camargue offre donc l'opportunité de comprendre l'ensemble de la région de façon globale et rigoureuse et, nous espérons, de proposer des pistes de gestion notamment en cas de perturbation majeure de la région.

▪ **Modèle de Pétri**

Nous avons développé un modèle qualitatif, discret et non déterministe (i.e. identifiant plusieurs trajectoires possibles à partir d'un même état du système), afin d'étudier les changements structurels du socio-écosystème camarguais. Les composants écologiques et socio-économiques matérielles constituent les nœuds du « graphe socio-écosystémique » (Annexe) que nous utilisons pour représenter l'écosystème. Chaque composante peut être fonctionnellement présente (i.e en 'on' ou +), ou fonctionnellement absente (i.e en 'off' ou -), sous forme booléenne. Elles sont reliées entre elles par des règles descriptives (les arrêtes du graphe), représentant des processus écologiques, socio-économiques ou autres interactions associées. Le graphe socio-écosystémique fournit donc une vue globale des interactions entre les composantes (mais où la nature de ces interactions n'est pas représentée).

L'état d'une composante matérielle du réseau dépend de celui des nœuds auxquels il est connecté, ainsi que des règles pouvant y être appliquées. Ces règles s'écrivent sous forme orientée de conditions et de réalisations : « conditions → réalisation ». La propriété dite « non déterministe » de ce type d'écriture induit que plusieurs règles peuvent se réaliser en même temps à partir d'un état du graphe systémique. Afin d'éviter la réalisation d'états irréalistes sur le long terme, des contraintes qui sont des règles obligatoires (prioritaires) peuvent être appliquées.

Après une initialisation des composantes selon certaines conditions initiales (composantes en 'on' ou 'off' dans le premier état du système), la sémantique traduit le système d'écriture en réseau de Pétri. Le modèle produit un espace d'état (Annexe) qui représente tous les états possibles rencontrés par le système depuis l'état initial et en suivant les règles définies. C'est cet espace d'état que nous allons étudier en détail pour comprendre le comportement global du système camarguais modélisé.

Dans l'espace d'état, différentes structures peuvent être retrouvées : notamment des « composantes fortement connexes » (ou Strongly Components System, SCCs) et des impasses dans lequel le système est qualitativement immobilisé (deadlocks). Les SCCs sont considérées comme des stabilités structurelles puisqu'elles se composent d'un ensemble d'états, à partir desquels chaque autre état est accessible. Ces stabilités sont dites terminales lorsque le système n'a pas la possibilité d'en sortir.

Différentes possibilités de représentation de l'espace d'état sont possibles, les plus usitées étant : celle dit de « graphe compacte » (ou Compact Graph, CG) où l'ensemble des états réalistes sont illustrés, ainsi que celle du « graphe compacte fusionné » (ou Compact Merged Graph, CMG), qui synthétise l'information en agglomérant l'ensemble des états appartenants à une SCC en un.

Les modèles ont été calculés avec Python 3.7 via une interface Jupyter.

Table 2 : Récapitulatif des composantes sélectionnées

Catégories	Appellation	Composantes	Commentaires	SR	SP
Acteurs locaux	Far	Farmers	Agriculteurs camarguais	+	+
	Hun	Hunters	Chasseurs	+	+
	Bre	Breeders	Eleveurs de taureaux, chevaux camarguais	+	+
	Fme	Fishermen		+	+
	Tou	Tourists		+	+
	Eco	Environmentalists	Ecologues, PNR, Tour du Valat	+	+
	Hab	Habitants	Habitants des Saintes-Maries, et des Salins de Giraud	+	+
Economique	Mar	Local market	PIB départemental	+	+
	FaBu	Farmers budget	Budget financier des agriculteurs	+	+
	FiBu	Fishermen budget	Budget des pêcheurs	+	+
	BBu	Breeders budget	Budget des éleveurs	+	+
	Sub	Subventions	Aides financières pour les riziculteurs (PAC)	+	-
	GBu	Government fond	Budget du gouvernement	+	+
Ressource en eau	Irr	Irrigation	Eau douce provenant du Rhône ou du Petit Rhône	+	+
Agricole	Ric	Rice production	Production de riz	+	+
	Cr	Crops production	Production maraichère (tomates, céréales, melon..)	+	+
	Pol	Pollutants	Produits phyto-sanitaires, engrais	+	+
Milieux aquatiques	Lag	Lagunes	Etangs	+	+
	Swa	Swamps	Marais	+	+
	SwH	Hunting swamps	Marais de chasse	+	+
Faune et flore	Ros	Roselière	Roselières	+	+
	Gra	Grasslands	Pelouses	+	+
	San	Sansouire	Sansouires	+	+
	Mac	Macrophytes	Herbiers aquatiques	+	+
	Bir	Birds	Oiseaux d'eau (canards, flamants roses, limicoles..)	+	+
	Wld	Wild life	Faune sauvage	+	+
	Inv	Invasive species	Espèces invasives (jussie, sangliers, écrevisses de Louisiane..)	+	+
	Liv	Livestock	Bétail (taureaux, chevaux)	+	+
	Fsh	Fishes populations	Poissons (loups, anguilles, athérines..)	+	+
Abiotique	Sal	Salinity	Taux de sel	-	-
	Med	Méditerranée	Ouverture vers la Méditerranée	+	+
	Rai	Rainfall	Précipitations	+	+

▪ **Méthodologie**

Dans le cadre de mon stage, la sélection des trente-deux composantes (Tab. 2) du modèle s'est effectuée selon leur appartenance aux principaux processus socio-écologiques, pouvant affecter fonctionnellement l'écosystème. L'échelle temporelle de la simulation du système est choisie sur les vingt prochaines années, les dynamiques des processus définis ayant été pensées sur le long terme. Dans ce cas-ci, la prise en compte de processus courts (tels que les saisonniers) entraînerait un biais dans le modèle quant aux effets éphémères. Les processus fortement longs ne seront pas considérés, car ils ne peuvent être inclus dans des mesures de gestions. Notre modèle intègre ainsi principalement des processus interannuels. La hiérarchisation des composantes, processus, ainsi que l'écriture des règles/contraintes ont été déduites de la littérature, ainsi que d'observations provenant de personnes expertes en hydrologie, écologie et d'occupants du territoire camarguais. L'aspect socio-économique de cette étude est étudié par des collaboratrices de la Tour du Valat en Camargue (Mélanie Trémoureux et Ilse Geizenfendorf). Des apports bibliographiques détaillés, ainsi que des entretiens directs avec les acteurs locaux (riziculteurs, chasseurs, Parc Naturel de Camargue, etc) ont fourni des données essentielles à l'élaboration du modèle. En collaboration étroite avec cette équipe, une sélection des services écosystémiques inhérents au site fut également réalisée (Annexe). Pour cela nous nous sommes basées sur la liste des SE présents en zones humides, réalisée par le CICES (Common International Classification of Ecosystem Services , V5.1) en 2017. Les services catégorisés par des processus abiotiques ne s'ont pas été sélectionnés (Tab. 3). Dans notre étude, un service est lié à l'application d'un ensemble de règles. Chaque règle a par conséquent été liée à au moins un service écosystémique. La réalisation d'une modélisation aspatialisée de l'île de Camargue s'est imposée comme une étape préliminaire indispensable pour comprendre le site dans son ensemble, de par les contraintes liées à l'interface de modélisation (Jupyter notebook). Néanmoins, une spatialisation implicite liée aux hypothèses de réflexion et connaissances sur le territoire se retrouve dans le modèle (Fig. 2). En effet, la distribution des espèces végétales en ceintures concentriques autour des marais et étangs résulte de leurs différences de tolérance à la submersion et la salinité (Grillas et Roché, 1997 ; Aznar *et al.*, 2003).

▪ **Analyses**

Une fois le modèle réalisé et l'espace d'état obtenu, des étapes de calibration et caractérisation du modèle sont poursuivies. Des histogrammes sur la fréquence des composantes dans l'espace d'état, puis des règles sont calculés afin d'analyser leurs occurrences, et de se prémunir de certaines incohérences. L'étude de la caractérisation des composantes (vérification dans l'écriture des règles de la présence des composantes en condition et en vérification) sert de diagnostic. Les matrices de présence-absence des composantes en fonction des états rencontrés permettent la réalisation d'Analyse Factorielle de Correspondance (AFC). Celles-ci décrivent partiellement les relations entre composantes et constituent une première étape de vérification de la dynamique du système modélisé. Des données sur les fréquences des composantes au sein d'une zone de stabilité (SCC) rendent possible l'emploi d'Analyse en Correspondance Principales, (ACP), qui renseignent sur l'importance relative de chaque composante dans ces situations qualitativement stables. De plus, des fonctions utilisées pour déterminer une composition d'états selon des critères spécifiques sont utilisées pour colorer les espaces d'état des scénarios (par exemple en fonction de différents types d'activités anthropiques: agriculture, élevage, chasse et pêche) (Annexe 2). Quand l'espace d'état étudié est composé d'une seule stabilité, il est possible de le colorer en fonction des conditions "on" et "o" des composantes, ceci pour chaque état. Des agrégations

Table 3 : Liste des services écosystémiques sélectionnés.

Services	Catégories
Cultures	Approvisionnement
Elevage à but d'approvisionnement	Approvisionnement
Prélèvement d'animaux sauvages à usage professionnel	Approvisionnement
Prélèvement d'animaux sauvages à usage personnel	Approvisionnement
Maintien des populations et habitats	Régulation
stockage/accumulation du carbone	Régulation
cycle hydrologique et régulation des écoulements d'eau (infiltration)	Régulation
dispersion des graines	Régulation
contrôle des ravageurs (espèces invasives comprises)	Régulation
filtration et régulation des conditions chimiques des eaux douces par des processus vivants	Régulation
régulation de la température et de l'humidité, comprenant la ventilation et la transpiration	Régulation
Espèces ayant une signification symbolique (flamants roses, taureaux, chevaux, canards, hérons, aigrettes, moustiques, anguilles, tellines)	Culturel
Espèces utilisées pour le divertissement ou la représentation (chevaux, taureaux)	Culturel
Caractéristiques ou fonctionnalités des sites ayant une valeur d'existence	Culturel
Caractéristiques de sites permettant la pratique d'activités favorisant la santé ou le plaisir	Culturel
Caractéristiques de sites considérés comme culturels ou patrimoniaux	Culturel

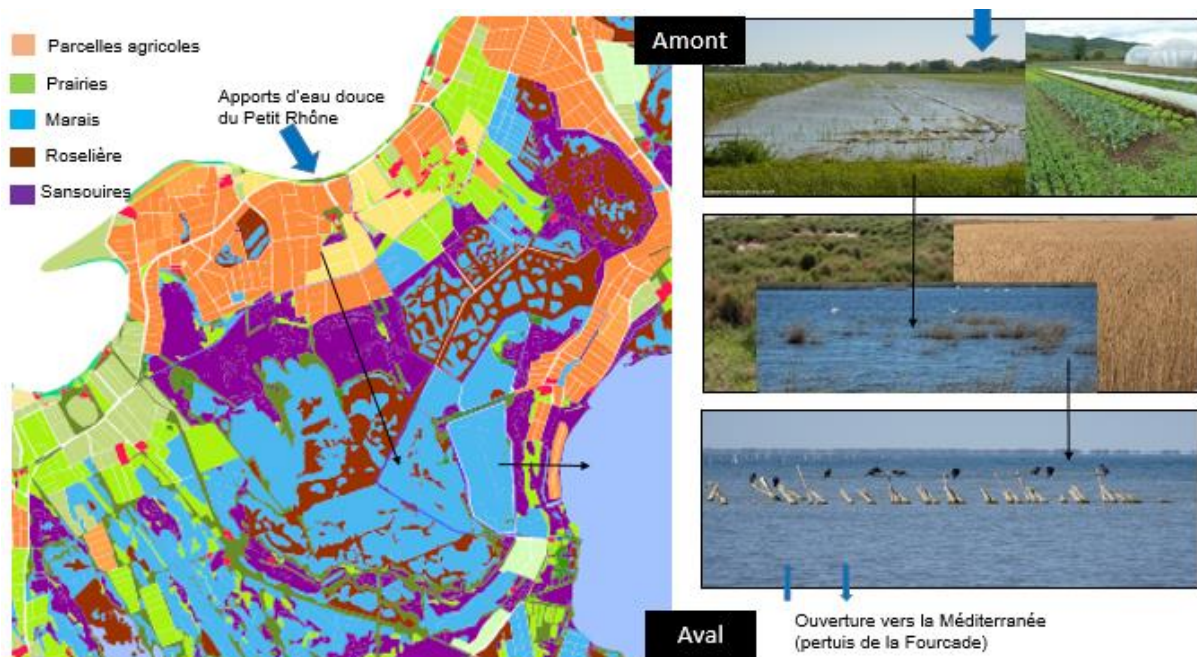


Figure 2 : Parallélisme entre une carte d'occupation du sol (Natura 2000) et un schéma générique de l'occupation du territoire en Camargue. En amont (sur les terres hautes et sur les bourrelets alluviaux principalement) se retrouve les parcelles agricoles. Certains agriculteurs pompent directement l'eau douce provenant du Rhône ou du Petit Rhône. Les canaux d'irrigation permettent une distribution de cette eau à l'ensemble des parcelles pratiquant la riziculture. Le besoin hydrique pour les cultures maraichères est quant à lui moindre. Le drainage des eaux agricoles via les canaux d'assainissement permet le maintien en eau des zones de marais et d'étangs en aval. Les zones de marais se composent majoritairement de sansouïres et de roselières.

différentes sont utilisées pour agréger les états colorés selon les critères choisis. Ainsi la visualisation des chemins possibles entre les différents critères est rendue possible (Annexe 2). L'agrégation "0" agrège les stabilités incluant les mêmes critères. L'agrégation "1" regroupe les stabilités discriminées, liées les unes aux autres. L'agrégation "2" permet de voir s'il est possible de passer d'un critère global de coloration à un autre (Fig.7). Pour chacune de ces agrégations, les règles indiquant les différentes voies possibles peuvent être affichées. La visualisation de la présence des activités anthropiques et des services écosystémiques dans l'espace d'état, s'effectuera par la coloration et l'agrégation « 2 » des états en fonction de leur composition en composantes écosystémiques. L'ensemble de ces analyses seront conduites simultanément sur le scénario de référence (SR) et le scénario perturbé (SP).

▪ **Scénario**

La réduction des apports d'eau douce en Camargue devient un scénario de plus en plus plausible. En effet, l'excès d'utilisation de cette ressource, ainsi que le dérèglement climatique sont aujourd'hui deux moteurs d'un changement hydrologique. A ceci s'ajoute la diminution continue des subventions accordées aux riziculteurs par la Politique Agricole Commune (PAC), alors que leur dépendance financière y est avérée. Sur le modèle de référence sera ainsi appliqué l'arrêt des subventions pour les riziculteurs, impliquant une réduction des apports d'eau douce en Camargue.

Résultats

▪ **Scénario de référence**

La représentation du socio-écosystème sous forme de graphe écosystémique, et à partir d'un algorithme qui minimise les croisements, porte des informations importantes sur son réseau d'interactions (Fig. 3). L'affiliation des composantes à une activité anthropique (i.e un module d'activité) constitue un facteur de regroupement, où les processus associés à une activité seront concentrés entre eux. Par exemple, les composantes de diverses natures liées respectivement à l'agriculture, l'élevage et la pêche sont à proximité les unes des autres (c.f coloration des modules). Les milieux naturels, comme la roselière et les pelouses ou les herbiers aquatiques sont associés de façon privilégiée au pâturage pour les végétations émergées, et aux milieux aquatiques pour les flores immergées. L'activité de pêche est excentrée, tandis que la chasse, une activité intermédiaire en lien avec plusieurs autres, sépare les activités agricoles et d'élevage. Les composantes abiotiques et économiques, telles que la Méditerranée (Med), les précipitations (Rai) ou les subventions accordées aux riziculteurs (Sub), se trouvent également en bordure du graphe et interagissent peu avec les autres composantes. Au contraire, l'irrigation, les milieux aquatiques, les végétaux halophytes et les oiseaux d'eau, se situent au centre du graphe du fait de leurs fortes interactions fonctionnelles avec les autres composantes.

▪ **Espace d'état de scénario de référence**

Le calcul de l'espace d'état (Fig. 4a) du scénario SR délivre une représentation simplifiée de la dynamique du socio-écosystème global. Elle est constituée d'une seule stabilité, comprenant 6 896 états. L'ensemble des composantes socio-écosystémiques est présent et

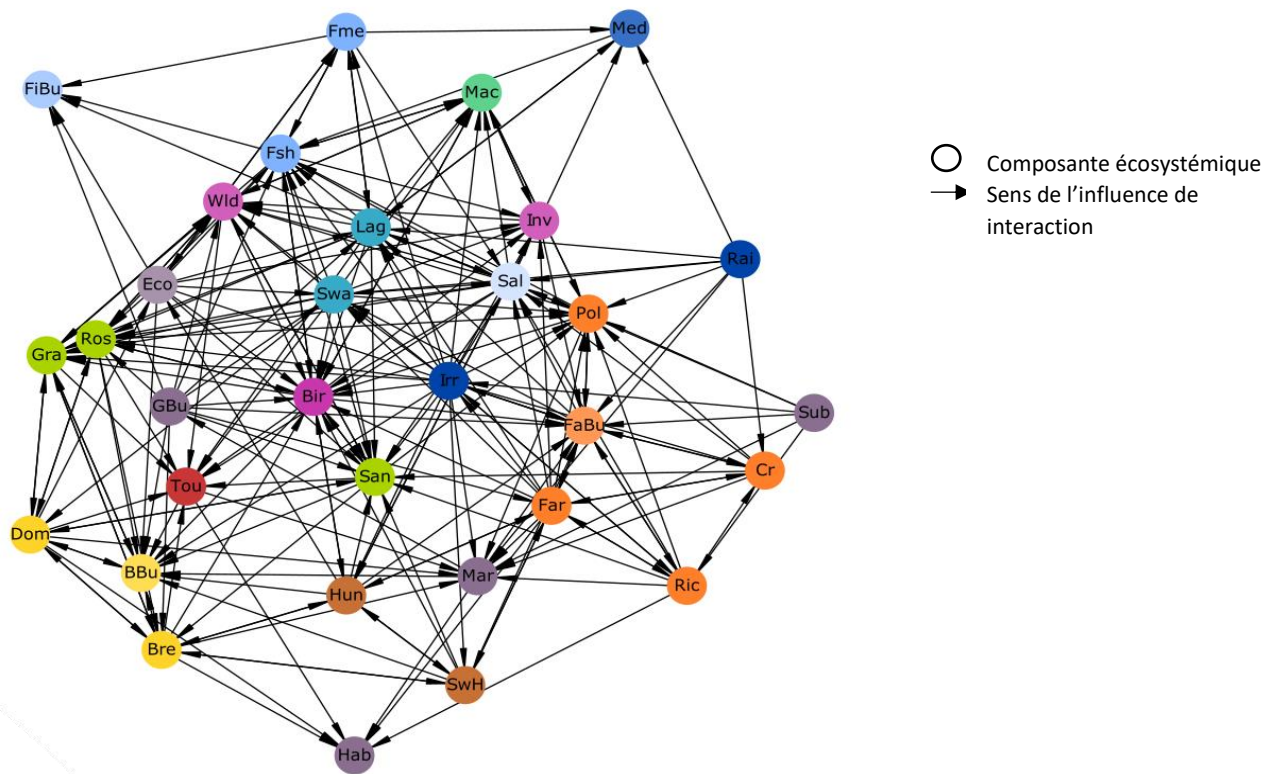


Figure 3 : Graphe écosystémique du scénario SR. Les composantes écosystémiques (voir Tab. 2) représentées sont de nature écologiques (ex : oiseaux), socio-économiques (ex : budget financier des agriculteurs) ou bien encore abiotiques (ex : salinité). Elles sont, dans ce graphe, reliées par des flèches symbolisant une interaction, partant des nœuds impliqués dans la condition vers ceux de la réalisation. La nature de cette interaction n'y est pas spécifiée. La proximité des composantes donne par conséquent une information sur leur degré d'interactions et d'influence entre elles. La coloration de chacune des composantes en fonction de leur appartenance à un module d'activité facilite leur visualisation sur le graphe (orange : agriculture ; jaune, élevage ; bleu, pêche ; marron, chasse ; gris, composantes socio-économiques ; bleu, milieux aquatiques et composante atmosphérique ; vert, végétations terrestres et aquatiques ; violet, faune ; rouge, touristes).

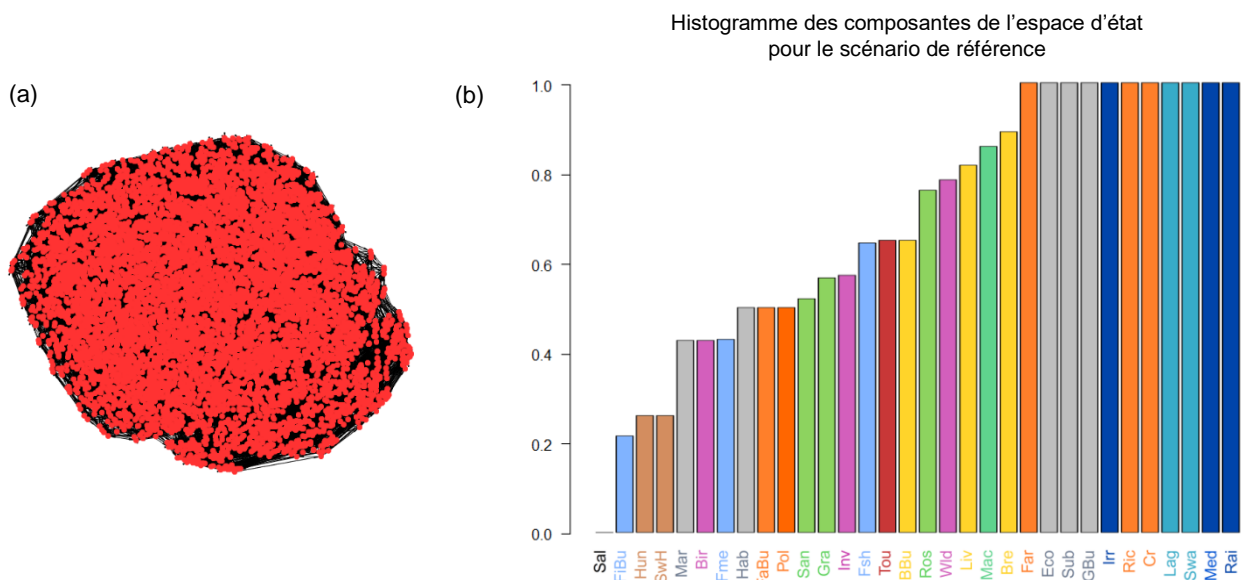


Figure 4 : (a) Représentation dite "compacte" de l'espace d'état comprenant 6896 états. (b) Histogramme des fréquences des composantes écosystémiques, réalisé à partir de l'espace d'état. Les colorations correspondent soit à l'appartenance des composantes à un type d'activité socio-économique, soit à leur nature biotique ou abiotique.

fluctue selon l'application des règles (Fig 4ab, Annexe 2). Dans cette stabilité, les milieux aquatiques (étangs et marais (Lag et Swa)) sont omniprésents. Les différents types de végétations (roselières, sansouires, pelouses, et herbiers aquatiques (Ros, San, Gra et Mac)) oscillent avec des fréquences allant de 0,52 à 0,87 de la stabilité totale. Les agriculteurs, les environnementalistes et les éleveurs sont les acteurs locaux majoritairement présents dans le système. Les activités de chasse (Hun) et de pêche (Fme) sont moins représentées dans le système, avec des fréquences de 0,23 et 0,4. La permanence de certaines composantes comme les subventions (Sub), les fonds du gouvernement (GBu) s'expliquent par leurs « semi-caractérisations » dans le modèle. Les composantes des marais (Swa), lagunes (Lag) ou la production de riz (Ric) ont des fréquences proches de 1, mais possèdent tout de même un faible nombre d'états où elles sont absentes (i.e 'off').

▪ **Représentation et analyse de l'espace d'état (SR)**

Dans notre modèle, les agriculteurs s'avèrent présents dans toutes les agrégations, et leur rôle dominant dans le maintien des autres activités anthropiques est clairement établi. Les trajectoires de perte ou de gain des activités révèlent celles présentes et celles impossibles. Notamment, la transition de la seule agriculture vers n'importe quelle agrégation avec l'élevage n'est pas observée. Une des trajectoires possibles et contre-intuitive pour arriver à l'agrégation agriculteurs + Eleveurs ('Far-Bre') nécessite de passer par l'activité de chasse.

L'AFC calculée (Fig. 6) sur les présences/absences des composantes écosystémiques dans les états du scénario de référence SR discrimine les composantes selon leurs corrélations avec les activités anthropiques. Les axes 1 et 2, qui capturent 21,8 et 13,6 % de la variance, se retrouvent les activités cynégétiques (chasse et pêche). L'axe 3 (9,8 %) est associé aux retombées économiques liées au tourisme, tandis que l'axe 4 (Y %) distingue l'activité d'élevage.

▪ **Scénario perturbé**

L'espace d'état compact du scénario perturbé SP (Fig. 7) montre des trajectoires drastiquement différentes de celles du scénario de référence. La stabilité initiale (identifiant n°4448) regroupe la majorité des états de l'espace (99.53% des 3464 états), et possède la même composition que la stabilité du scénario de référence. L'application des règles 44 (pour des raisons économiques) et/ou 55 (par des dommages agricoles) mettent les riziculteurs en difficultés financières. Les conséquences en sont révélées par les deux ensembles colorés de stabilités, à partir desquels plus aucun retour vers la stabilité initiale n'est possible. Leurs compositions en composantes écosystémiques sont similaires, et ne diffèrent que par la présence d'espèces invasives dans un cas. Dans ces deux ensembles aux trajectoires miroirs, s'observe une disparition drastique des composantes biotiques et socio-économiques liées aux milieux aquatiques (Fig. 8). Ces milieux n'étant plus fonctionnellement présents et la salinité étant élevée, la sansouire devient le type de végétation dominant. L'élevage du bétail subsiste grâce à cette permanence végétale, mais la pêche et la chasse disparaissent. Des pratiques maraichères réalisées sous serres, alimentées par les précipitations plutôt que l'irrigation, permettent aux agriculteurs de subsister dans ce scénario perturbé.

▪ **Analyses des services écosystémiques dans les scénarios**

L'identification des processus selon leur appartenance à un ou plusieurs des services sélectionnés (SEs) révèle leurs présences au sein des deux scénarios que l'on peut révéler avec un critère d'agrégation (Fig. 8 et 9). Dans le modèle, les fonctions hydrologiques de drainage conditionnent fortement les différents types de services de maintien des populations (Fig. 8). Les services de dispersion des graines, ceux hydrologiques et de maintien des populations sont des étapes nécessaires à la permanence de l'ensemble des services

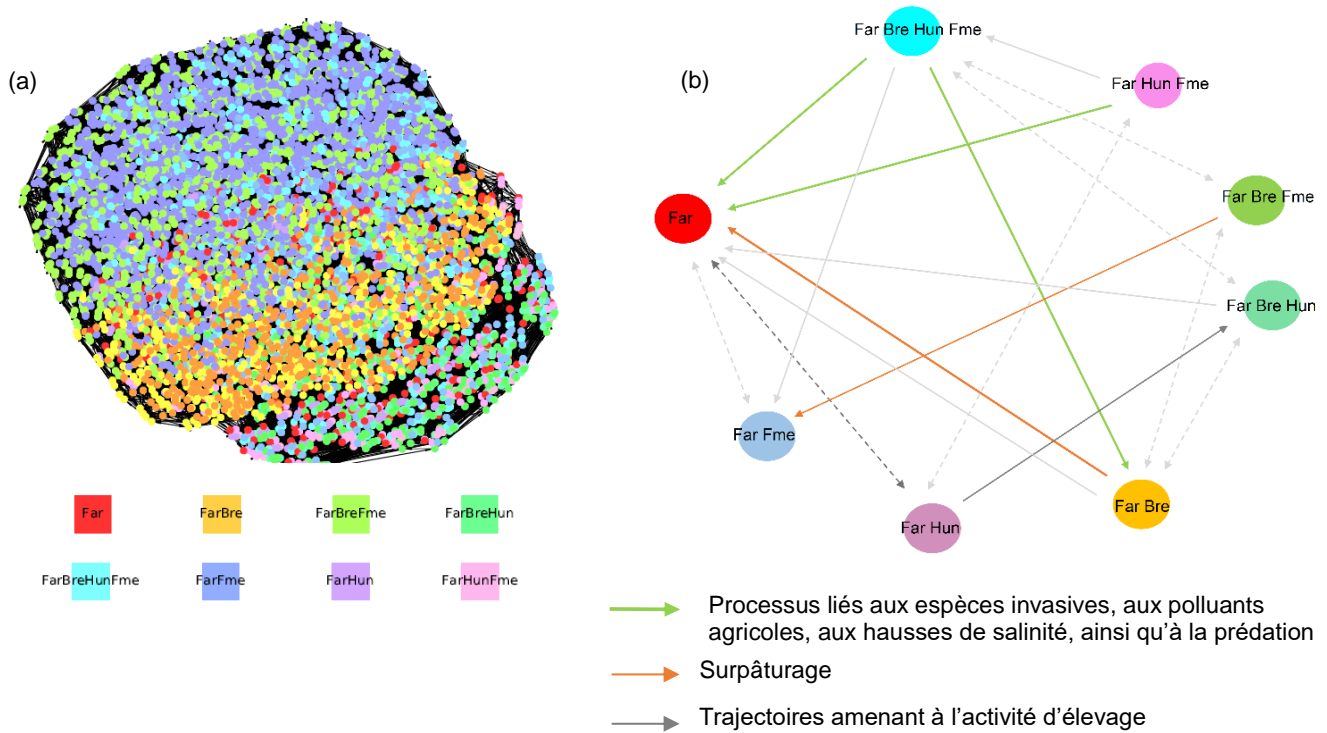


Figure 5 : (a) Représentation dite "compacte" de l'espace d'état du scénario de référence avec une coloration des états selon la présence ou l'absence des activités humaines agricoles (Far), d'élevage (Bre), de pêche (Fme) et de chasse (Hun). (b) Agrégation des états colorés. Les flèches symbolisent ici les processus nécessaires au passage d'une agrégation à une autre. Le code couleur entre (a) et (b) est le même.

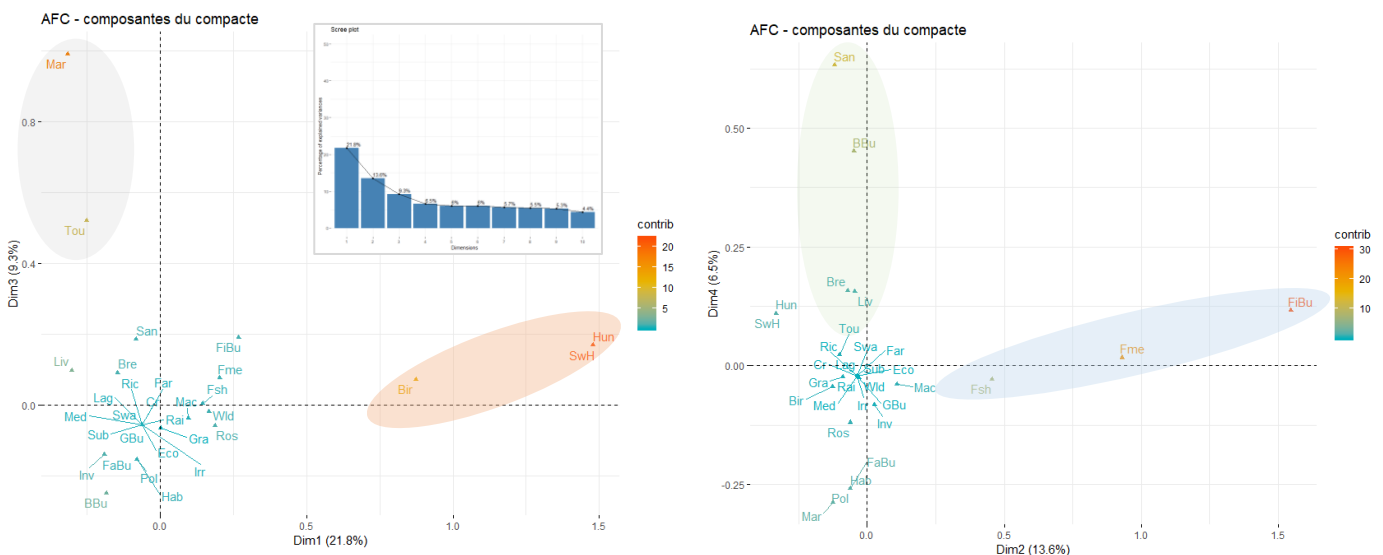


Figure 6 : AFC des matrices (présence-absence) composantes, selon les axes 1-3 et 2-4. Les composantes sont ici représentées selon leurs contributions relatives aux axes factoriels. Les ellipses colorées illustrent la discrimination des composantes le long des différents axes. Un tableau des inerties est également présent sur l'AFC de gauche.

représentés dans ce résultat. De façon attendue, les services de chasse et pêche passent préalablement par des services de maintien-dispersion des graines et des services de maintien-cycle hydrologique, respectivement (Fig. 8, couleur orange et bleu clair).

L'agrégation des services d'élevage, de cultures, avec les différents types de services de maintien (Fig. 10) convergent vers un ensemble d'états où sont uniquement présents les SE d'élevage, de cultures et des services de maintien spécifiques. Le caractère indépendant de l'agriculture déjà mis en évidence (Fig. 5b), est cette fois retrouvé par rapport aux divers services de maintien (Fig. 10). L'analyse plus fine cet ensemble d'état, montre que les états représentés sont ceux présents dans les stabilités terminales (Fig. 11). Trois processus de maintien sont présents dans l'ensemble des agrégations: la salinisation des étangs, la colonisation des sansouires sur les marais, et la perte de biodiversité liée à la hausse de salinité.

Discussion

Les modèles discrets et qualitatifs, à base de réseaux de Petri, offrent un moyen de visualiser puis de comprendre les changements structurels du socio-écosystème camarguais. Bien que générique et spatialement implicite, la modélisation des composantes et des processus dominants dans le fonctionnement du système, a capturé le comportement d'ensemble de ses dynamiques sur le long terme (ici ~30 ans).

Le fonctionnement modélisé de la Camargue

Le graphe écosystémique, en rapprochant les composantes écologiques des composantes socio-économiques ou abiotiques du système global étudié (Fig. 3), prouve la cohérence, l'équilibre et la validité de notre modélisation. Il est important de rappeler que nous l'avons défini en listant les processus, avec un souci d'objectivité. Les apports d'eau douce, se retrouvent bien en au centre du graphe écosystémique coïncidant avec l'influence écologique que l'eau douce possède sur les milieux et l'importance qu'elle revêt pour l'ensemble des acteurs de Camargue (Cheiron *et al.*, 2016). L'espace d'état obtenu met en évidence le caractère d'ensemble résilient du scénario de référence (Fig. 4a) et contribue à traiter notre question (Q1). Avec une seule stabilité de plusieurs milliers d'états, cette résilience face à des perturbations mineures (i.e. déstabilisation économique ou perte fonctionnelle de certains milieux naturels), correspond à la dynamique actuelle du socio-écosystème qui se maintient depuis des décennies (Petit et Honneger, 2006 ; Lavoux *et al.*, 2011 ; Arnaud-Fassetta *et al.*, 2010). La maîtrise du régime hydrologique depuis le XVII^{ème} siècle s'est également accompagnée d'une maîtrise de la salinisation des terres (Mouquet, 2004). Outre son profil moyen, proche de l'agriculture et des milieux saumâtres que l'on retrouve dans le graphe écosystémique (Fig. 3), le caractère résilient du scénario de référence (où la salinité est fonctionnellement absente du système), conforte cette régulation avérée du sel sur le territoire camarguais. La dynamique du scénario de référence s'appuie également sur des liens étroits entre composantes socio-économiques et écologiques (Fig. 3, 4b). L'intégration des composantes socio-économiques dans le modèle, tels que les fonds étatiques (subventions) alloués au territoire de Camargue, rappelle leurs influences sur les composantes associées aux milieux naturels et aux milieux aquatiques (Fig. 3). Elles confirment le rôle fondamental que jouent les institutions au travers des plans d'action nationaux, de fonds consacrés à la conservation en Camargue ou de subventions accordées aux acteurs locaux (Vial et Collin, 2012). Ces subventions, destinées principalement aux riziculteurs et aux

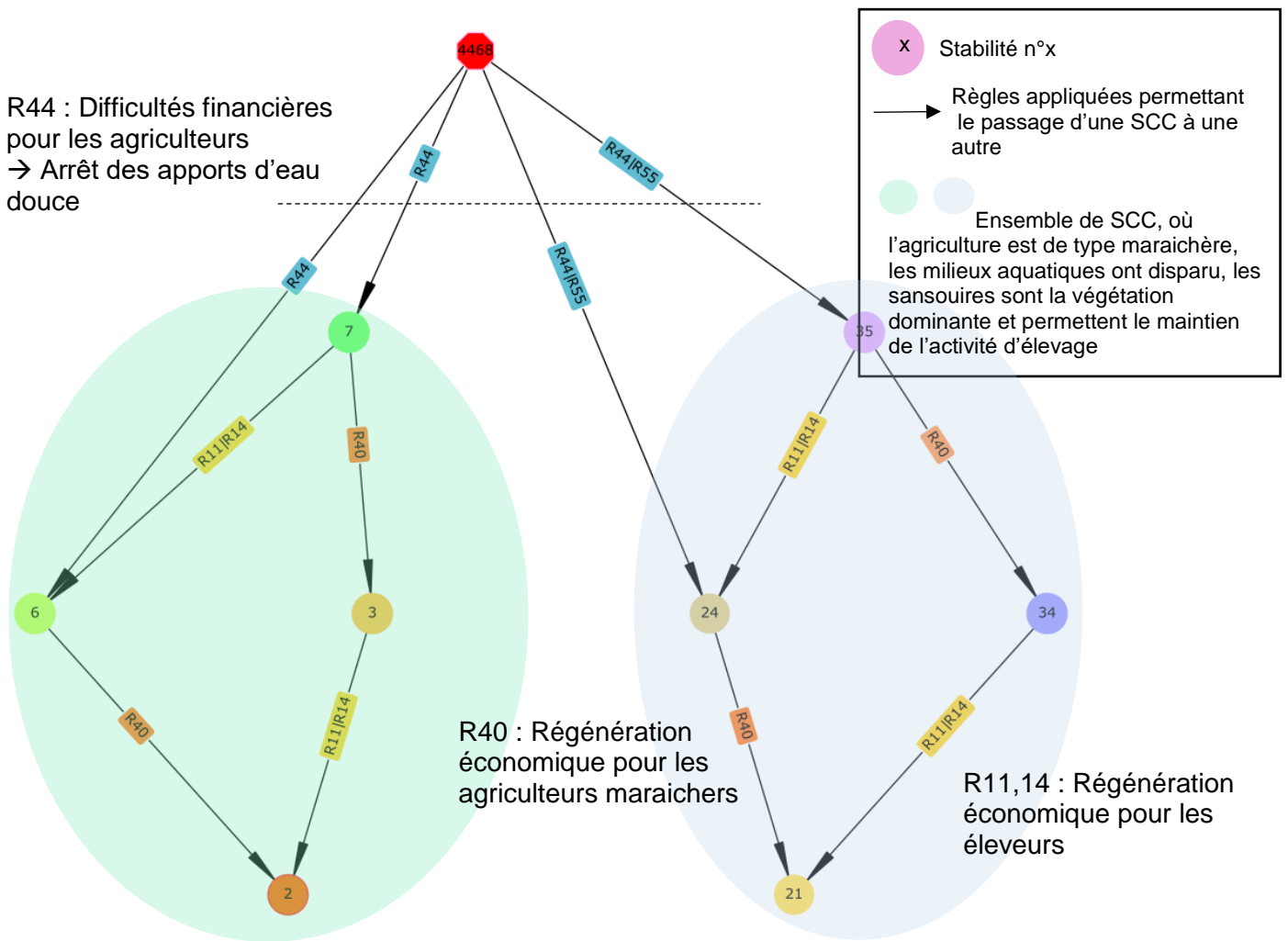


Figure 7 : Espace d'état compacté du scénario perturbé. Les stabilités sont ici différenciées par des colorations différentes. La transition de l'une vers l'autre se fait par l'application d'une ou plusieurs règles, les flèches donnant le sens de cette transition.

Histogramme des composantes sur les deux ensembles de SCC terminales du scénario perturbé

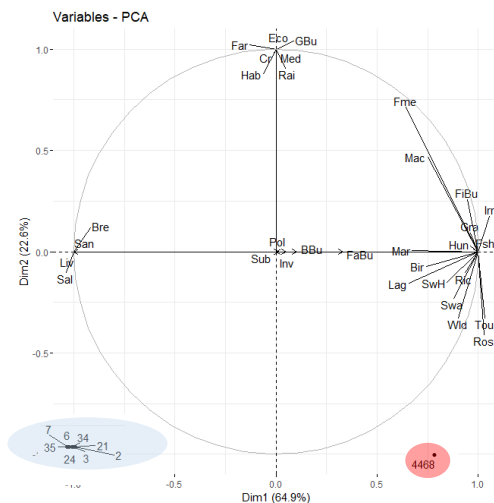
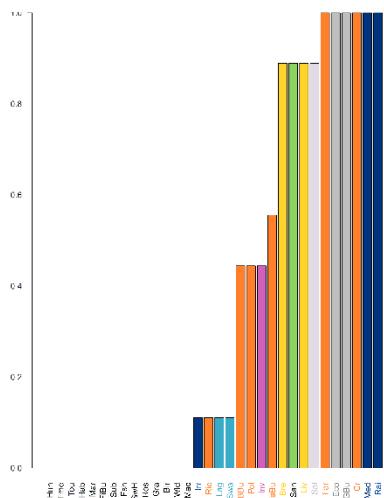


Figure 8 : (a) Histogramme des composantes pour les deux ensembles de SCC terminales du scénario perturbé. (b) ACP réalisé sur la matrice SCC-composantes de l'espace d'état du scénario perturbé.

éleveurs, s'avèrent décisives et impactent un grand nombre de mécanismes secondaires (e.g. production alimentaire, tourisme et apports d'eau douce, pâturage, Dervieux, 2005).

La disposition périphérique de la pêche au sein du graphe écosystémique (Fig. 3), ainsi que les distributions des composantes écosystémiques dans les AFCs (Fig. 5), illustrent bien à la fois les interdépendances de la pêche avec les milieux aquatiques et celles de la chasse avec la présence des oiseaux d'eau. Les pratiques de chasse sont essentiellement présentes sur des propriétés privées pouvant appartenir à des éleveurs et/ou à des agriculteurs. Ces derniers, en obtenant une contrepartie financière des chasseurs, maintiennent en eau des « marais de chasse » présents sur leurs terres aval, attirant des oiseaux d'eau (notamment les canards, Mathevet, 2004). L'agrégation des activités humaines au sein de l'espace d'état révèle aussi des interactions sociales (Fig. 6). L'indépendance des agriculteurs renvoie autant à leur position, sur les terres amont de la Camargue, qu'à leur accès facilité à l'eau douce provenant du Rhône (Blondel, 2005). Au contraire, la dépendance des autres activités humaines à celle de l'agriculture est nettement visible dans le modèle, puisque les composantes écosystémiques liées à la chasse, la pêche et l'élevage ne sont pas retrouvés dans l'espace d'état sans la présence des agriculteurs. Les trajectoires non réalisées (i.e. que l'on ne retrouve pas dans les chemins entre agrégations de l'espace d'état) fournissent également de précieuses informations. Par exemple, l'activité d'élevage ne se maintient pas sans les présences simultanées de l'agriculture et de la chasse (Fig. 6). Selon les processus de notre modèle, les oiseaux d'eau sont fonctionnellement présents lorsque des zones d'alimentation (marais), de refuge (roseaux) et de reproduction sont disponibles. La présence implicite de marais et de milieux nécessaires au pâturage explique la nécessité de cette cascade d'activités.

Dynamique de la Camargue avec l'application de la perturbation

Le scénario perturbé SP (Fig. 7 et 8, Annexe 2) montre une dynamique irréversible, et foncièrement différente du scénario de référence (Q1). Les stabilités terminales rassemblent des états avec une forte (re)salinisation due à l'arrêt des apports d'eaux douces : les milieux aquatiques, la faune et la flore sont fonctionnellement absents, et seules subsistent les activités agricoles et d'élevages qui peuvent tolérer ces degrés de salinisation. Ainsi, la perturbation appliquée au scénario a des impacts majeurs sur le fonctionnement du socio-écosystème, affectant simultanément les activités anthropiques et les processus écologiques.

Dans ce scénario la conjonction de l'arrêt des subventions de la PAC vers les riziculteurs et de leurs difficultés financières engendre l'arrêt de la production du riz sur le territoire, ainsi que l'arrêt des apports d'eau douce. Ce scénario reste crédible, car bien qu'un abandon total de la riziculture ne soit pas arrivé dans le passé, des réductions importantes des surfaces de rizières ont eu lieu dans les années 70, suite à une réorganisation du marché européen du riz et à une meilleure rentabilité des cultures céréalières (Mathevet *et al.*, 2004 ; Nguyen et Purseigle, 2015). Avec l'arrêt des importants volumes d'eau douce introduits en Camargue, le maintien fonctionnel actuel des marais et lagunes serait fortement mis en danger. Une modélisation du régime hydrologique de l'étang central de Camargue, le Vaccarès, a permis d'analyser les conséquences de l'arrêt des drainages agricoles dans cet étang (Boutron *et al.*, 2019). Les précipitations, à elles seules, ne seraient pas capables de maintenir le fonctionnement de l'étang et le conduirait à une forte salinisation. En effet, l'évaporation est le processus principal qui contribue aux assèchements des étendues d'eau en Camargue et contrebalance aisément les apports d'eau par les précipitations, avec une perte de 1 400 mm/an (Chauvelon *et al.*,

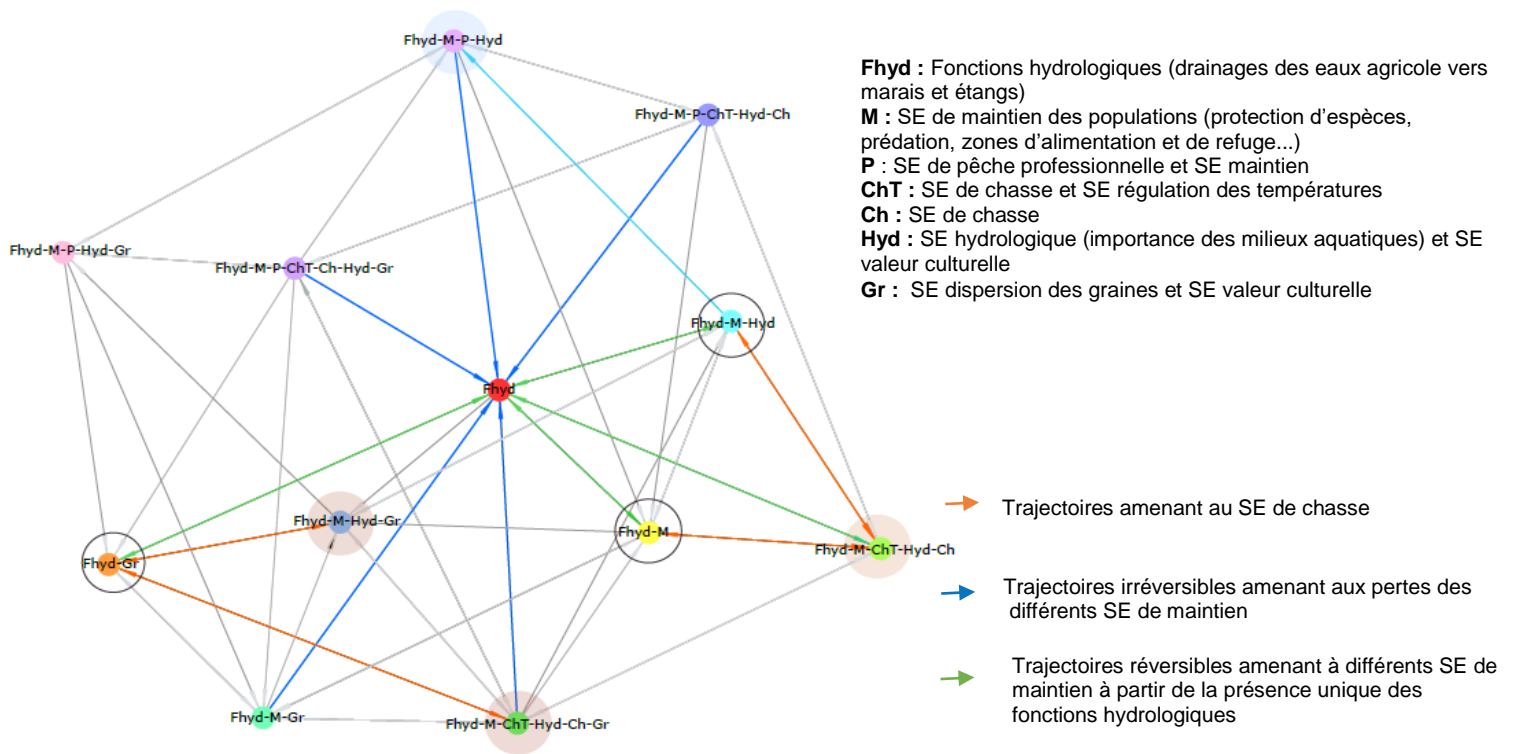


Figure 9 : Agrégation des différents types de services de maintien et des fonctions hydrologiques présents dans le scénario de référence. Les légères colorations marron soulignent les services de chasse et de maintien, tandis que celles en bleu mettent en valeur le service de pêche et de maintien des populations de poissons. Les agrégations cernées de noir permettent de visualiser les gains des différents services de maintien, de cycle hydrologique, et de dispersion des graines à partir de la seule présence des fonctions hydrologiques dans l'espace d'état.

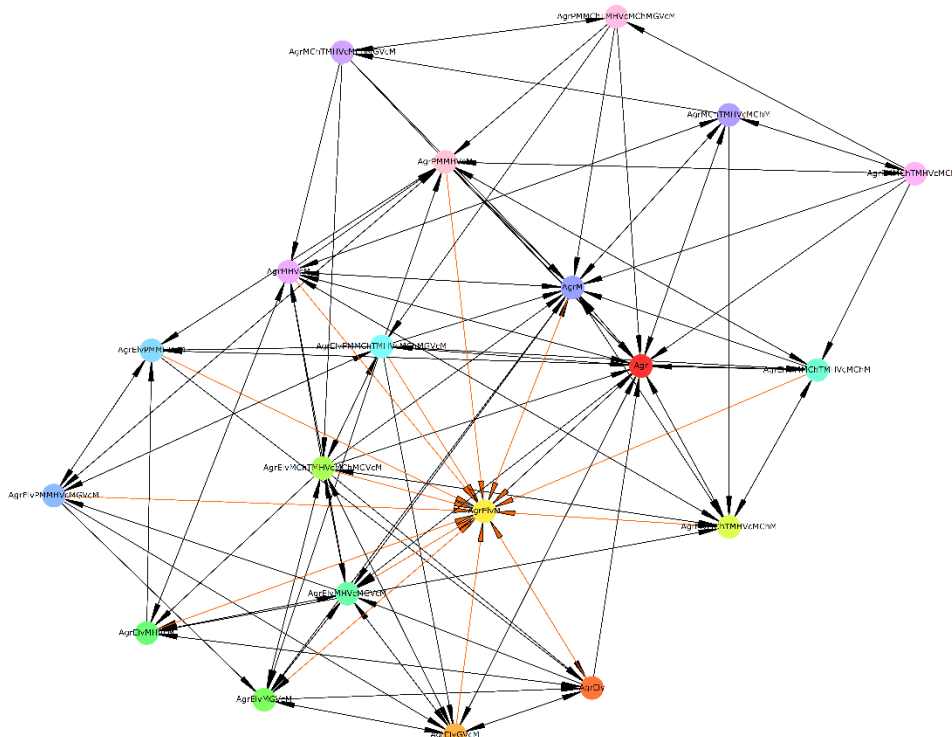


Figure 10 : Agrégation des différents types de services de maintien ainsi que des services d'agriculture et d'élevage présents dans le scénario perturbé. Les trajectoires colorées en orange représentent les applications des règles 44 et 55 de mise en difficultés financières des agriculteurs.

2003). Associée aux résurgences des nappes phréatiques salées, une perte conséquente des milieux aquatiques, ainsi qu'une salinisation des terres constituent des trajectoires systémiques que nous retrouvons bien dans l'espace d'état du scénario perturbé SP (Q1, Q2). Les deux ensembles de stabilités finales (Fig. 7, Fig. 8) accueillent une végétation possédant seulement des sansouires. Les roselières et les pelouses ne peuvent en effet pas tolérer de fortes concentrations de sel. Par leur caractère halophyte (Grillas et Roché, 1997), les sansouires constitutives des prés salés semblent être la flore capable de subsister dans ce scénario. Bien que nutritivement peu riche, associées aux fourrages, les sansouires permettent pourtant le maintien de l'élevage des chevaux et taureaux camarguais. La permanence de l'élevage dans ce scénario est d'autant plus cohérente qu'au XIXe siècle les remontées salines étant très présentes, les grands espaces camarguais n'étaient exploitables que par l'élevage extensif de bovins et de chevaux (Raynaud, 2015). La réapparition des activités économiques liées aux éleveurs et agriculteurs dans le scénario SP est due à la vente de bétail et à la production maraîchère (Fig. 7). Néanmoins, la place du tourisme dans le scénario perturbé est peu représentée, alors qu'une diversification des activités économiques telle que de l'éco-tourisme tourné vers les éleveurs (e.g. taureaux, chevaux) est tout à fait envisageable dans cette configuration du territoire (Lavoux *et al.*, 2011). Dans le modèle, la chasse est étroitement liée à la présence d'oiseaux d'eau et marais de chasse, mais cette activité pourrait aussi s'appuyer sur des espèces invasives (e.g. le sanglier).

Trajectoires des scénarios

Dans ces deux scénarios se retrouvent des socio-écosystèmes aux fonctionnements particulièrement différents. Nos résultats montrent en effet que l'altération du régime hydrologique entraîne une perte drastique des zones humides présentes en Camargue au profit d'une forte salinisation des terres. Leurs fonctionnalités étant considérées comme essentielles (Bouzellé, 2014), leurs pertes, à l'heure où les zones humides sont perçues comme des 'tampons climatiques naturels' (Geijzenborffer *et al.*, 2018), constitueraient un danger important pour la pérennité du littoral méditerranéen français.

En Camargue, l'aménagement du territoire à des fins de préservation de l'environnement et de la biodiversité, peut être facilité ou ralenti par les jeux d'acteurs et leurs intérêts personnels (Dervieux, 2005). En gestion de l'eau notamment, la notion de « collectif » a souvent supplanté les logiques individualistes par la mise en œuvre d'une Charte de l'environnement et d'un SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux) au début des années 1990 (Petit et Honneger, 2006). Ainsi, si une nouvelle crise rizicole se profilait (scénario parfaitement plausible, puisque la PAC sera rediscutée en juin 2019 par le conseil européen des ministres de l'Agriculture), la gestion de l'eau en Camargue perdrait-elle de son artificialité au profit d'une gestion durable de l'écosystème et un retour à une variabilité hydrique plus « naturelle » ?

Cette possibilité n'a pas été incluse dans notre scénario perturbé, mais des apports d'eau douce suffisants pour maintenir certains milieux naturels emblématiques de Camargue est tout à fait envisageable. Dans la zone des Salins, au sud-est de la Camargue, un retour à une gestion de l'eau non dirigée a, par exemple, permis des reconnections hydrauliques et écologiques entre la Méditerranée et les étangs (Segura *et al.*, 2018). Notre modèle pourrait d'ailleurs prendre en compte quelques processus hydrologiques additionnels qui vérifieraient ces nouvelles trajectoires, plus durables, que le système rejoindrait. L'utilisation rationnelle des ressources et le maintien des zones humides en Camargue, est de plus un scénario de développement durable étudié. Il a été démontré qu'il est possible de parvenir à la fois à la sécurité alimentaire et à l'utilisation rationnelle des zones humides par l'amélioration des

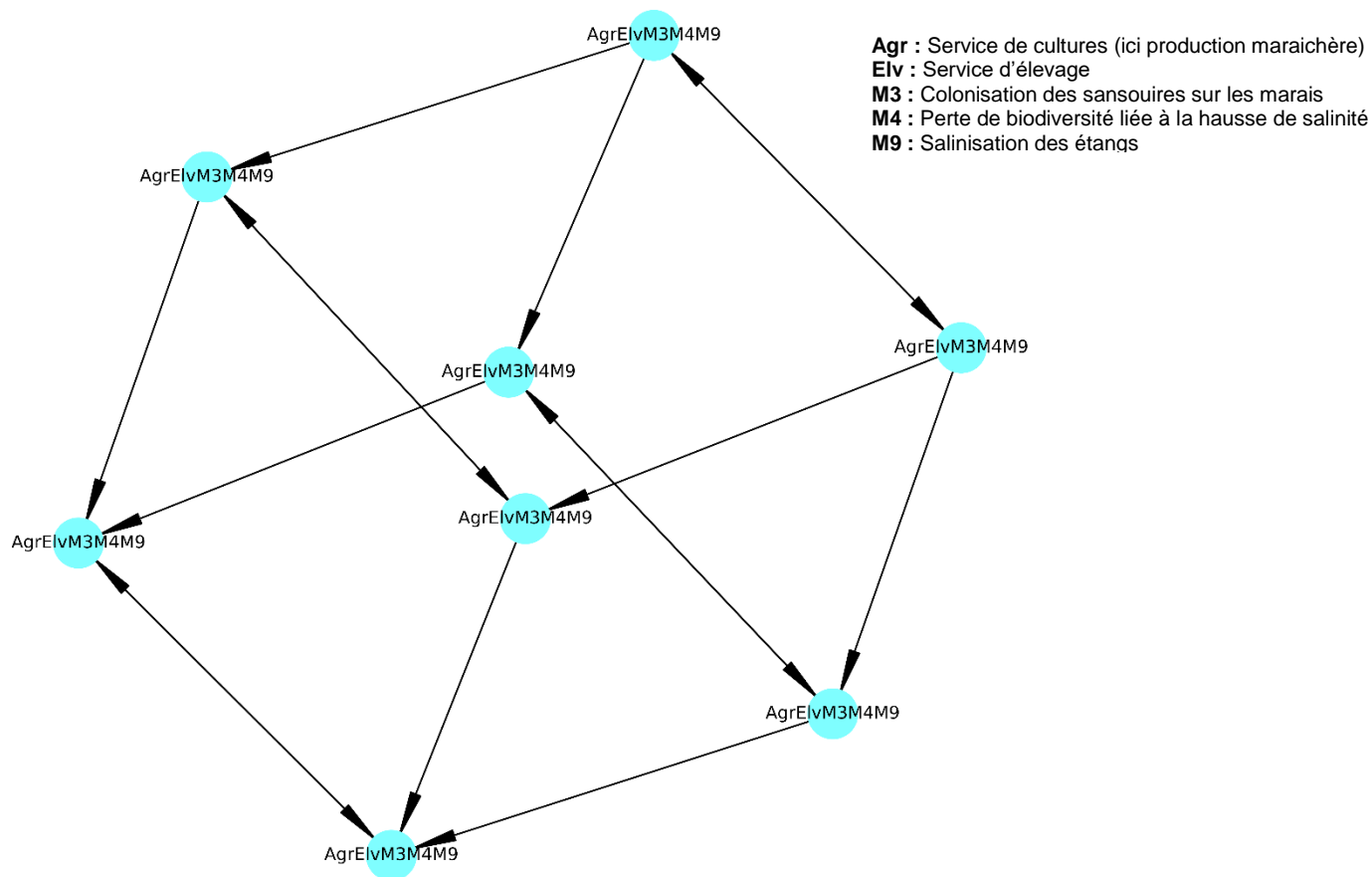


Figure 11 : Agrégation des services de maintien ainsi que des services d'agriculture et d'élevage présents dans les deux ensembles de SCC terminales du scénario perturbé. Les trajectoires et agrégations des deux ensembles de SCC sont similaires, un seul ensemble sera donc présenté dans cette figure.

rendements des systèmes pluviaux et une efficacité accrue des systèmes irrigués (Malek *et al.*, 2018).

Les trajectoires du scénario perturbé reflètent seulement les perspectives actuelles et dominantes des acteurs locaux (c.f. entretiens réalisés par la Tour du Valat). La riziculture pourrait subsister sur certaines zones en Camargue à cause de l'attachement culturel et identitaire pour la culture du riz. Le riz semé à sec, nécessitant moins d'apports hydriques, pourrait également maintenir la riziculture dans une Camargue plus sèche et plus salinisée. Ces nouvelles formes de production agricole sont complexes et particulièrement difficiles à envisager pour les acteurs locaux. Leurs projections (telles que l'équipe de la Tour du Valat a pu les récolter) s'inscrivent à un instant donné et ne reflètent que les éventualités agricoles accessibles dans leurs situations socio-économiques actuelles. La réduction progressive du caractère familial des exploitations, la présence d'investisseurs non agricoles (Nguyen et Purseigle, 2015), et la fertilité future des sols, rendent très difficiles la prédiction des possibles trajectoires socio-économiques. Notre modèle se voulait intégré, à l'ensemble de la Camargue et toutes ses composantes, mais ne possède cependant pas cette finesse socioéconomique.

Services écosystémiques

Les services de régulation constituent les processus abiotiques ou abiotiques les plus importants pour le maintien des populations et habitats naturels, la régulation des écoulements d'eau, l'épuration de l'eau douce, le stockage du carbone, etc (Zedler et Kercher, 2005). Leurs permanences dans le système sont fortement liées aux fonctions hydrologiques de drainage des eaux d'après nos résultats sur le scénario SR (Fig. 9). Cette association fonctions hydrologiques-services de support est vérifiée dans la littérature, avec des influences à a fois directes ou indirectes de ces fonctions sur les SE (McLaughlin et Cohen, 2013). Le caractère résilient du scénario SR se retrouve dans les trajectoires réversibles de présence-absence des services de maintien représentés (Fig. 9). Les différents types des services de maintien présents en Camargue, ainsi que le service de dispersion des graines, et les services liés aux milieux aquatiques constituent les piliers d'un retour vers la présence de l'ensemble des services (Fig. 9).

La disparition de la quasi-totalité des services de régulation dans le scénario SR (Fig. 10) est corrélée à la perte des milieux humides sur le territoire. Sans ces services de régulation, la Camargue sera d'autant plus sensible à l'élévation du niveau marin. Bien que les activités de cultures et d'élevage perdurent dans cette configuration, les services associés (Fig. 11) de salinisation des étangs, de colonisation des sansouires, pourraient sur le plus long terme L'intégration des SEs dans les démarches de gestion collective des ressources soulève de nombreuses questions/difficultés. Chaque acteur possède ses propres objectifs de conservation, selon ses activités, et conserve un point de vue subjectif sur les bénéfices des services écosystémiques (Bullock et Acreman, 2003). Par ailleurs, la relation entre la localisation des services et leurs bénéficiaires diffère selon la nature des services écosystémiques. Une cartographie des services culturels et d'approvisionnement, ainsi que l'identification de leurs bénéficiaires restent des tâches relativement aisées. Ce n'est pas le cas des bénéficiaires des services de régulation et de maintien des milieux naturels, bien plus complexes à cerner (Beltrame *et al.*, 2013). Ils présentent en effet des intérêts socio-écologiques immatériels, et leurs importances pour les utilisateurs locaux et le reste de la population soulèvent la question du bien commun des ressources naturelles. De plus, les interdépendances entre la biodiversité, les composantes écosystémiques, les processus et les services écosystémiques ne sont pas parfaitement compris (Harrison *et al.*, 2014). Dans le cadre d'une gestion pérenne d'un socio-écosystème telle qu'en Camargue, des perspectives

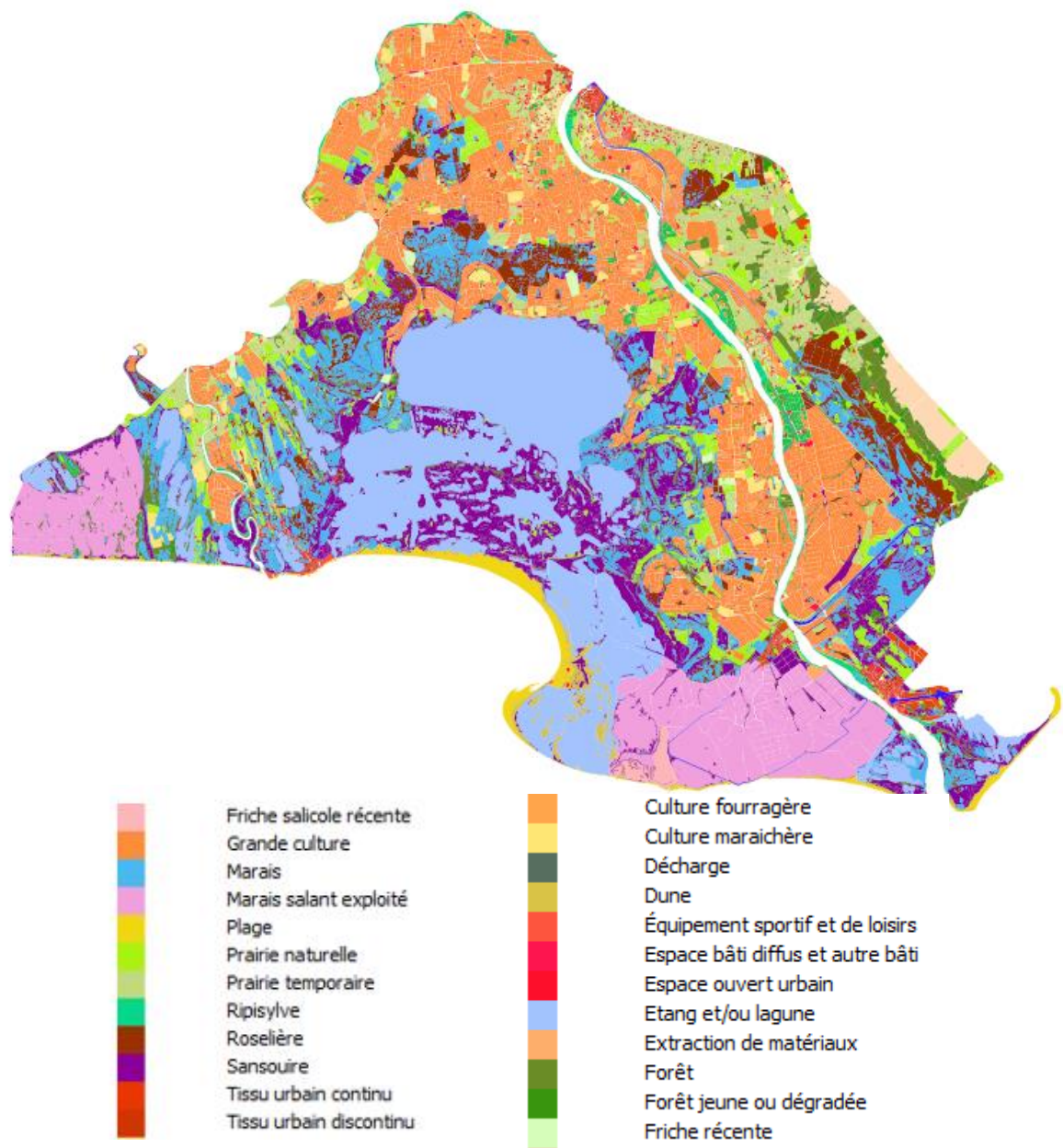
de recherche devront étudier la sensibilité et de la durabilité des bouquets de services écosystémiques.

A cette échelle d'incertitude et de conflit des décisions locales, s'ajoute l'échelle internationale qui, à travers la classification de la Camargue en site Ramsar, engage sur le papier les états à préserver les zones humides présentes sur leurs sols. En moyenne, les pays méditerranéens n'appliquent que la moitié des mesures demandées dans le Plan stratégique Ramsar (Geijzendorffer *et al.*, 2018). La perte et/ou la dégradation des zones humides naturelles diminuent les capacités d'épuration des zones humides, et de régulation des niveaux d'eau et températures. L'insuffisante mise en pratique des accords internationaux est d'autant plus grave que les changements climatiques s'amplifient aux abords des zones humides côtières, et affecteront fortement la pérennité des socio-écosystèmes associés. Ainsi, la gestion des ressources et milieux naturels s'effectue à différents niveaux institutionnels, comme le montre notre modèle (Fig. 2, Fig. 4, Ostrom, 2009). L'intégration des risques liés aux usages de l'écosystème et une vision plus axée sur la co-viabilité des sous-systèmes socio-économiques et écologiques sont fortement recommandées pour une gestion durable de ces zones.

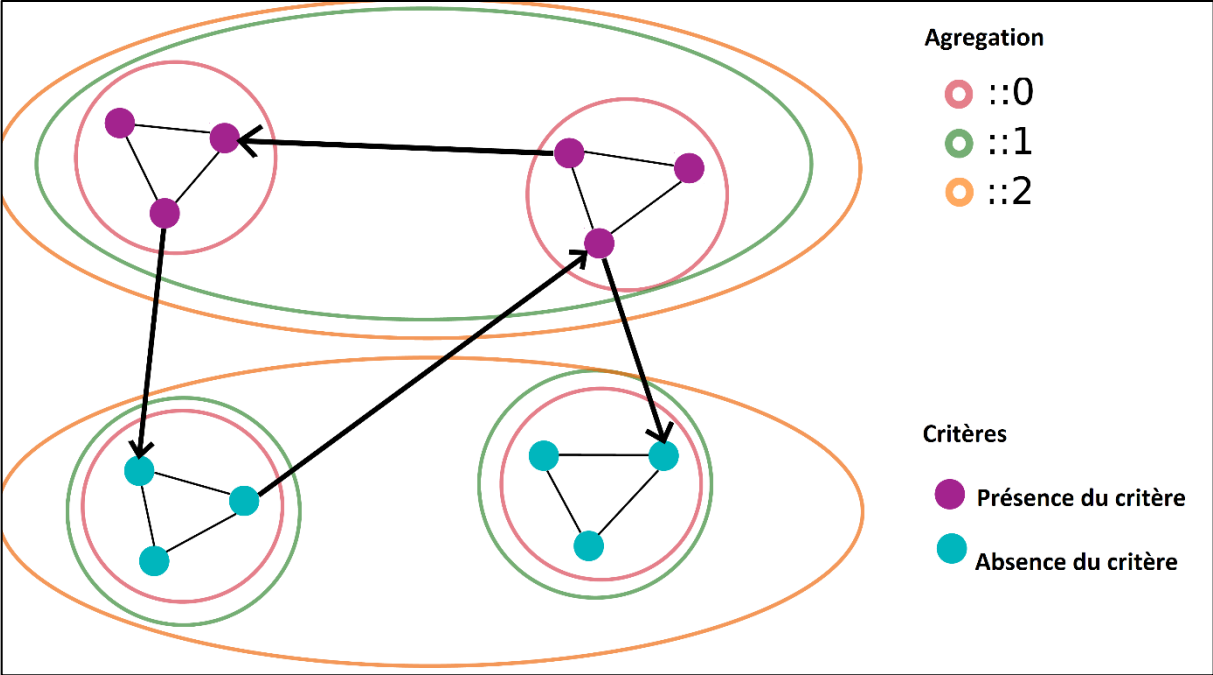
▪ Conclusion

Les modèles se basant sur des réseaux de Petri sont particulièrement intéressants afin d'étudier le fonctionnement actuel et futur des écosystèmes. Le caractère non-déterministe de ce type de modèle rend de plus possible l'exploration de l'ensemble des trajectoires éventuelles empruntées par le système. Il serait intéressant de poursuivre l'étude du socio-écosystème camarguais avec cet outil afin de répondre à ces problématiques de gestion de l'eau. En s'affranchissant notamment des contraintes liées à une taille maximale de modèle, ou en utilisant un outil de spatialisation en cours de développement, une étude spatialisée de la Camargue serait particulièrement intéressante à réaliser. Elle permettrait de prendre en compte plus finement les disparités géomorphologiques du territoire, les résurgences salines et une diversité de comportements des acteurs locaux. L'implantation aux composantes de seuils « ++ », intégrerait de plus une notion de seuils fonctionnels, expliquant plus explicitement l'intensité d'interaction des processus sur les composantes. Dans le même ordre, une indication temporelle plus adaptée des processus apporterait des informations pertinentes sur la résilience ou l'effondrement du système. Une analyse plus poussée des trajectoires au travers permettrait également d'étudier en détail la contribution des bouquets de processus à l'établissement d'un ou plusieurs services écosystémiques. Enfin, il serait enthousiasmant d'intégrer à notre modèle des 'coefficients' aux composantes socio-économiques, qui permettrait par exemple d'étudier les poids sociaux, culturels, économiques et politiques des différents acteurs du territoire.

▪ **Annexes**



Annexe 1: Carte d'occupation des sols en Camargue (Natura 2000)



Annexe 2 : Schéma explicatif d'agrégation des critères.

Annexe 3 : Récapitulatif des structures des espaces d'états (compactes et fusionnés) des deux scénarios

N°	Structure	Nbr d'états	Composantes en 'on'	Composantes en 'off'
<i>Scénario de référence</i>				
1	init+scc	6896	Eco,Lag,Far,Sub,Ric,Irr,Cr,Swa,GBu,Med,Rai	Sal

<i>Scénario perturbé</i>				
4468	init+scc	3448	Gbu, FaBu, Far, Ric,Cr,Irr, Lag, Swa, Med, Sal, Rai	Sub, Sal
6	scc	2	GBu, Eco, Far, Cr, Bre, BBU, Liv, San, Inv, Med, Sal, Rai	Sub, Mar, FaBu, Ric, Pol, Irr, Hun, SwH, Tou, Fme, FiBu, Fsh, Lag, Swa, Mac, Ros, Gra, Bir, Wld
7	scc	2	GBu, Eco, Far, Cr, Bre, Liv, San, Inv, Med, Sal, Rai	Sub, Mar, FaBu, Ric, Pol, Irr, BBU, Hun, SwH, Tou, Fme, FiBu, Fsh, Lag, Swa, Mac, Ros, Gra, Bir, Wld
3	scc	2	GBu, Eco, Far, FaBu, Cr, Pol, Bre, Liv, San, Inv, Med, Sal, Rai	Sub, Mar, Ric, Irr, BBU, Hun, SwH, Tou, Fme, FiBu, Fsh, Lag, Swa, Mac, Ros, Gra, Bir, Wld, Inv
2	scc	2	GBu, Eco, Far, FaBu, Cr, Pol, Bre, BBU, Liv, San, Inv, Med, Sal, Rai	Sub, Mar, Ric, Irr, Hun, SwH, Tou, Fme, FiBu, Fsh, Lag, Swa, Mac, Ros, Gra, Bir, Wld
24	scc	2	GBu, Eco, Far, Cr, Bre, BBU, Liv, San, Med, Sal, Rai	Sub, Mar, FaBu, Ric, Pol, Irr, Hun, SwH, Tou, Fme, FiBu, Fsh, Lag, Swa, Mac, Ros, Gra, Bir, Wld, Inv
35	scc	2	GBu, Eco, Far, Cr, Bre, Liv, San, Med, Sal, Rai	Sub, Mar, FaBu, Ric, Pol, Irr, BBU, Hun, SwH, Tou, Fme, FiBu, Fsh, Lag, Swa, Mac, Ros, Gra, Bir, Wld, Inv
21	scc	2	GBu, Eco, Far, FaBu, Cr, Pol, Bre, BBU, Liv, San, Inv, Med, Sal, Rai	Sub, Mar, Ric, Irr, Hun, SwH, Tou, Fme, FiBu, Fsh, Lag, Swa, Mac, Ros, Gra, Bir, Wld, Inv
34	scc	2	GBu, Eco, Far, FaBu, Cr, Pol, Bre, Liv, San, Med, Sal, Rai	Sub, Mar, Ric, Irr, BBU, Hun, SwH, Tou, Fme, FiBu, Fsh, Lag, Swa, Mac, Ros, Gra, Bir, Wld, Inv

Annexe 4 : Règles composant les scénarios de référence et perturbé.

N°	Contraintes/Règles	Références
C1	Far-, Bre-, Tou- >> Mar- Sans activités économiques, le PIB regional en patit	(Rulleau, 2016)
C2	Tou- >> Mar- Le tourisme représente une part importante des activités économiques du département	(Rulleau, 2016)
C3	Lag- >> Fsh-, Mac-, Fme-, FiBu- Sans étangs, absence de poissons, d'herbiers et de pêcheurs	(Frontier et al., 2008)
C4	Mac- >> Fsh-, Bir- Sans macrophytes, dérèglement des chaînes trophiques	(Frontier et al., 2008)
C5	Fsh- >> Fme-, FiBu- Sans poissons, les pêcheurs et leurs budgets sont absents du système	Sens commun
C6	Irr- >> Ric-, SwH-, Lag-, Swa-, Sal+, Fme-, Fsh-, Mac- Sans irrigation, perte des milieux aquatiques	(Mathevet, 2004)
C7	Ric-, Cr-, SwH-, Hun-, FaBu- >> Far- La combinaison des absences des cultures, des marais de chasse, et des difficultés financières conduisent les agriculteurs à arrêter leur activité	Sens commun
C8	Far- >> Ric-, Cr-, FaBu-, Pol- Les agriculteurs sont les seuls acteurs à cultiver, à utiliser des polluants	Sens commun
C9	Ric-, Cr- >> Pol-, Sal+, San+ L'absence de cultures induit l'absence de polluants, une augmentation de la salinité, et une développement des sansouires	Sens commun
C10	Bir- >> Hun- Sans oiseaux d'eau, les chasseurs ne seraient pas présents sur le territoire	(Mathevet, 2004)
C11	SwH-, Swa- >> Bir- La perte des oiseaux d'eau est due à l'absence combinée des marais de chasse et des marais naturels	(SNPN, 2013)
C12	Hun- >> SwH- La présence des chasseurs induit la présence de marais de chasse	(Mathevet, 2004)
C13	Ric- >> Irr- La riziculture conditionne totalement les apports d'eau douce en Camargue	(SNPN, 2013)
C14	Far+, FaBu-, Sub- >> Irr-, Ric-, Pol-, Sal+ L'arrêt des subventions et les difficultés financières des agriculteurs entraînent l'arrêt de la riziculture, et des apports d'eau	(Ernoul, 2012)
C15	Bre-, Liv- >> Tou-, BBu- L'absence des éleveurs entraine la perte du tourisme lié au bétail (chevaux, taureaux) et la disparition de leur budget	(Poitelon <i>et al.</i> , 2016)
C16	Liv-, SwH-, Hun- >> Bre-, San- L'absence combinée des activités liées à l'élevage entraine la perte des éleveurs et la fermeture du milieu	Sens commun
C17	Ros-, Gra-, San- >> Liv-, Bre-, BBu-, Tou-	(SNPN, 2013)

	Sans milieux naturels, l'élevage ne peut être pratiqué	
C18	SwH-, Bir-, Inv- >> Hun- Sans marais de chasse et oiseaux d'eau, absence de chasseurs	(Mathevet, 2004)
C19	Bre-, Liv- >> BBU-	Sens commun
C20	Lag-, Swa-, Sal+ >> Bir-, Fsh-, Wld-, Tou- L'absence de milieux aquatiques entraîne une perte de la biodiversité, et impacte le tourisme	(Poitelon <i>et al.</i> , 2016)
C21	Ros-, San-, Gra-, Mac- >> Wld- La perte combinée des milieux naturels fait chuter la biodiversité	(SNPN, 2013)
C22	Lag-, Swa-, Sal+ >> Ros-, Gra-, Mac-, San+ La perte des milieux aquatiques et la forte salinisation des terres entraînent la perte des flores	(SNPN, 2013)
C23	Wld- >> Bir- Support systémique de la biodiversité aux oiseaux d'eau	(Frontier <i>et al.</i> , 2008 ; SNPN, 2013)
C24	Swa- >> Bir-, San+, Sal+	(SNPN, 2013)
C25	Ros- >> Bir- Impacts de l'absence de zones de refuge et de nidification pour les oiseaux d'eau	(Chazel, 2013)
R1	GBu+ >> Far+ Réglementation permet implantation des agriculteurs	(PNRC, 2012)
R2	GBu+, Gra+, Ros+ >> Bre+ Réglementation et présence indispensable des milieux naturels pour l'implantation des éleveurs	(PNRC, 2012)
R3	Eco+, Lag+ >> Fme+ Le Vaccarès faisant partie de la Réserve de Camargue, le PNR réglemente l'installation des pêcheurs professionnels	(PNRC, 2012)
R4	BBu+, Bre+, Ros+, San+, Swa+ >> Liv+ Les milieux naturels permettant l'utilisation des terres par le bétail	(Chazel, 2013)
R5	BBu+, Bre+, Gra+ >> Liv+ Pelouses permettant l'utilisation des terres par le bétail	(Heurtefeux <i>et al.</i> , 2008)
R6	Liv+ >> Gra- Herbivorie	(Heurtefeux <i>et al.</i> , 2008)
R7	Liv+ >> Ros- Herbivorie	(Chazel, 2013)
R8	Liv+ >> San- Herbivorie	(Chazel, 2013)
R9	Liv+ >> Eco+, Gra+ Régénération du milieu par le pâturage	(Pearce et Crivelli, 1994 ; Carpentier M2)
R10	Liv+ >> Eco+, Ros+, San+ Régénération du milieu par le pâturage	(Pearce et Crivelli, 1994 ; Carpentier M2)
R11	Bre+, Liv+ >> BBU+ L'activité d'élevage contribue au budget financier des éleveurs (vente bétail, boucherie..)	(Poitelon <i>et al.</i> , 2016)

R12	Bre+, Liv+ >> Hab+, Tou+ L'élevage participe à la venue des touristes (promenades à cheval, course taurine..)	(Dervieux, 2005)
R13	Bre+, Liv+, Tou+ >> BBU+, Mar+ Tourisme augmente le budget des éleveurs et constitue une part significative de l'économie locale	(Poitelon <i>et al.</i> , 2016)
R14	Bre+, Eco+, GBu+ >> BBU+ Subventions (PAC et Mesures AgroEnvironnementales et climatiques)	(Ernoul, 2012)
R15	Bre+, GBu+, Mar+ >> BBU- Les décisions politiques associées à l'économie peuvent impacter négativement le budget des éleveurs	(Poitelon <i>et al.</i> , 2016)
R16	BBu+, Bre+, Irr+ >> Gra+ Les éleveurs utilisent les canaux d'irrigation et d'assainissement pour maintenir leurs prairies	(Blondel, 2005)
R17	Bre+, Irr+ >> Bir+, Hun+, SwH+ Les éleveurs mettent en eau leurs marais de chasse afin d'attirer les oiseaux d'eau pour la chasse	(Cheiron <i>et al.</i> , 2011)
R18	Bir+, Bre+, Hun+, Irr+, SwH+ >> BBU+ Les chasseurs paient un droit d'utilisation des terres aux éleveurs	(Blondel, 2005)
R19	Hun+, SwH+ >> Bir- Impacts de la chasse sur les oiseaux d'eau	(Mathevet, 2004)
R20	Bir+, Lag+, San+, Swa+, Wld+ >> Tou+ Venue des touristes par attrait pour la faune et les milieux naturels camarguais	(Poitelon <i>et al.</i> , 2016)
R21	Tou+ >> Hab+, Mar+ Venue des touristes bénéficient aux habitants et au PIB départemental (hébergement, restauration..)	(Heurtefeux <i>et al.</i> , 2008 ; Poitelon <i>et al.</i> , 2016)
R22	Fme+, Fsh+ >> FiBu+ La pêche professionnelle rapporte de l'argent aux pêcheurs	(Poitelon <i>et al.</i> , 2016)
R23	Eco+, Fme+, GBu+ >> FiBu- Les décisions politiques associées à l'économie peuvent impacter négativement le budget des pêcheurs	(Poitelon <i>et al.</i> , 2016)
R24	Rai+, Irr+ >> Swa+, Lag+, Sal- Les précipitations associées aux drainages agricoles, permettent le maintien fonctionnel actuel des marais et étangs	(Boutron <i>et al.</i> , 2019)
R25	Lag+ >> Fsh+, Mac+, Wld+ Développement des populations de poissons, herbiers dans les lagunes	(Chazel, 2013)
R26	Swa+ >> Fsh+, Mac+, Ros+, San+, Wld+ Maintien de la végétation et de la faune grâce aux marais	(Chazel, 2013)
R27	Lag+, Mac+ >> Fsh+ Zones d'alimentation, de refuge, pour les populations de poissons	(Chazel, 2013)
R28	Mac+, Swa+ >> Fsh+, Wld+ Zones d'alimentation, de refuge, pour la faune	(Chazel, 2013)

R29	Med+ >> Fsh+, Lag+ Recrutement en larves, juvéniles des espèces migratoires	(Cheiron <i>et al.</i> ,2011)
R30	Lag+, Rai+, Irr- >> Sal+, Lag- L'apport seul d'eau douce par les précipitations est insuffisant pour maintenir les étangs à son état fonctionnel de référence	(Boutron <i>et al.</i> , 2019)
R31	Fme+, Sal+, Lag-, Rai- >> Med+, Sal-, Lag+ Demande des pêcheurs d'ouvrir les vannes du pertuis de la Fourcade, lorsque les étangs sont excessivement salés	(Cheiron <i>et al.</i> ,2011)
R32	Fme+ >> Fsh- Surpêche	(SNPN, 2013)
R33	Eco+, GBu+ >> Fsh+ Réglementation et protection des anguilles, gobies, l'aloise dans le Vaccarès	(Cheiron <i>et al.</i> ,2011)
R34	Fme+ >> Fsh+, Eco+ Régulation des populations	(Frontier <i>et al.</i> , 2008).
R35	Bir+, Eco+, Fsh+ >> Inv- Les luttes par piégeages ou élimination, associées à la prédation naturelle peuvent arriver à diminuer les populations d'espèces invasives	(Costa, 2005)
R36	Eco+, GBu+, Irr+ >> Lag+, Ros+, San+, Swa+, Wld+ Directive Habitats-Faune-Flore	(Dervieux, 2005 ; Cheiron <i>et al.</i> ,2011)
R37	FaBu+, Far+, Sub+ >> Irr+, Pol+, Ric+ Avec suffisamment de budget financier, les agriculteurs peuvent produire du riz (implique l'utilisation d'importants volume d'eau et d'intrants)	(Cheiron <i>et al.</i> ,2011)
R38	FaBu+, Far+ >> Cr+, Pol+ Avec suffisamment de budget financier, les agriculteurs peuvent produire des cultures maraichères	(Poitelon <i>et al.</i> , 2016)
R39	Far+, Irr-, Ric-, Rai+ >> Cr+, Pol+, FaBu+, Mar+	(Dervieux, 2005 ; Poitelon <i>et al.</i> , 2016)
R40	Far+, Irr+, Pol+, Ric+, Sub+ >> FaBu+, Mar+ Apports financiers	(Dervieux, 2005 ; Poitelon <i>et al.</i> , 2016)
R41	Far+, Cr+, Pol+ >> Mar+, FaBu+ Apports financiers	(SNPN, 2013 ; Poitelon <i>et al.</i> , 2016)
R42	Eco+, Far+, Sub+ >> FaBu+ Subventions (PAC et Mesures AgroEnvironnementales et climatiques)	(Ernoul, 2012)
R43	Far+, GBu+, Mar+ >> FaBu- Les décisions politiques associées à l'économie peuvent impacter négativement le budget des éleveurs	(Poitelon <i>et al.</i> , 2016)
R44	FaBu+, Far+, Irr+ >> Lag+, Pol+, Sal- Contamination chronique des écosystèmes aquatiques et de leurs réseaux trophiques	(Dervieux, 2005 ; Cheiron <i>et al.</i> ,2011)
R45	FaBu+, Far+, Irr+ >> Pol+, Sal-, Swa+ Contamination chronique des écosystèmes aquatiques et de leurs réseaux trophiques	(Dervieux, 2005 ; Cheiron <i>et al.</i> ,2011)

R46	Sw+ >> Ros+, San+ Les zones de marais abritent les conditions abiotiques permettant le développement des roselières et des sansouires	(Chazel, 2013)
R47	Ros+, San+, Sw+ >> Bir+ Développement des oiseaux d'eau dans les marais-les roselières. Ces sites sont des zones de refuges, d'alimentation.	(Chazel, 2013)
R48	Eco+, GBU+, Sw+ >> Bir+ Directive Habitats-Faune-Flore, Directive Oiseaux	(SNPN, 2013)
R49	Hun+ >> Bir+, Eco+ Régulation des populations d'oiseaux d'eau	(Frontier et al., 2008).
R50	Far+, Irr+ >> Bir+, Hun+, SwH+ Les éleveurs mettent en eau leurs marais de chasse afin d'attirer les oiseaux d'eau pour la chasse	(Cheiron <i>et al.</i> , 2011)
R51	Bir+, Far+, Hun+, Irr+, SwH+ >> FaBu+ Les chasseurs versent un droit d'utilisation des terres aux éleveurs	(Blondel, 2005).
R52	Far+, Ric- >> Hab- La perte du riz impacte culturellement les habitants locaux	(Blondel, 2005)
R53	Far+, Irr+, Sal- >> Bir+ Venue des oiseaux d'eau lorsque les parcelles sont immergées	(SNPN, 2013)
R54	Bir+, Far+, Inv-, Irr+, Ric+ >> FaBu- L'ensemble des dommages liés aux oiseaux d'eau et les espèces invasives (adventices et sangliers) contribuent à mettre en difficulté financière les agriculteurs	(Costa, 2005)
R55	Far+, Irr+, Ric-, Cr-, Hun+, Bir+ >> FaBu+ Les agriculteurs perçoivent des revenus grâce aux chasseurs qui viennent chasser sur leurs parcelles	(Blondel, 2005)
R56	Far+, Hun+ >> Inv+ Les agriculteurs participent au maintien des espèces invasives (sangliers) en les nourrissant	(Mathevet, 2004)
R57	GBU+, Inv+ >> FaBu+ Dédommagements de l'état suite aux dégâts des sangliers sur les parcelles agricoles	(Costa, 2005)
R58	Hun+ >> Inv- Chasse des sangliers	(Mathevet, 2004 ; Blondel, 2005)
R59	Irr+, Mac+, Sw+ >> Inv+ Les canaux d'irrigation sont propices à la colonisation des espèces invasives	(Dervieux et Aznar, 2003)
R60	Inv+ >> Mac- Certaines espèces invasives induisent une dégradation de la qualité de l'eau, une augmentation de la turbidité (impacts sur les herbiers)	(Costa, 2005)
R61	Rai+ >> Sw+, Sal- La pluie permet de maintenir fonctionnellement les marais	Sens commun
R62	Rai- >> Sw-, Sal+ Période plus ou moins longue d'assèchements	Sens commun

R63	Sal+ >> Mac-, Wld- Banalisation de la biodiversité	(Dervieux, 2005)
R64	Sal+, Swa- >> San+ Grignotage des sansouires sur les marais	(PNRC, 2012)
R66	Far+, Irr+, Lag+, Swa+ >> Pol- Dilution des polluants	Sens commun
R67	Mac+, Ros+, San+ >> Pol- Filtration, bioséquestration des polluants par la végétation	(Elifantz, 2002 ; Frontier et al., 2008)
R68	Lag+, Pol+ >> Fsh-, Mac-	(Cheiron <i>et al.</i> , 2011)
R69	Pol+, Swa+ >> Bir-, Mac-, Wld- Substances s'accumulent dans les organismes à tous les niveaux du réseau trophique.	(Cheiron <i>et al.</i> , 2011)
R70	Inv+ >> Wld- Colonisation des milieux par les espèces invasives plus compétitrices	(Dervieux, 2005)
R71	Bir+ >> Fsh- Prédation	(Frontier et al., 2008)
R72	Fsh+ >> Mac- Prédation	(Frontier et al., 2008.
R73	Bir+, Fsh+, Wld+ >> Gra+, Mac+, Ros+, San+ Dispersion des graines, soutien des organismes au maintien de la végétation	(Frontier et al., 2008)
R74	Fsh- >> Bir- Sans poissons dans le système, les oiseaux d'eau s'en trouveraient impactés	(Frontier et al., 2008).
R75	Mar- >> Hab- Une situation économique difficile impacte les habitants (leur budget par exemple)	(Poitelon <i>et al.</i> , 2016)
R76	Mar+ >> GBu+ L'économie renfloue les finances de l'état	(Poitelon <i>et al.</i> , 2016)

Bibliographie :

Anderies J.M., Janssen M.A., & Ostrom E. 2004. A Framework to Analyze the Robustness of Social-ecological Systems from an Institutional Perspective. *Ecology and Society*. 9(1).

Arnaud-Fassetta G., Carcaud N., Castanet C., & Salvador P.-G. 2010. Fluviale palaeoenvironments in archaeological context: Geographical position, methodological approach and global change – Hydrological risk issues. *Quaternary International*. 216(1 2), p. 93 117.

Aznar J.-C., Dervieux A., & Grillas P. 2003. Association between aquatic vegetation and landscape indicators of human pressure. *Wetlands*. 23(1), p. 149 160.

Baldan P., Bocci M., Brigolin D., Cocco N., Heiner M., & Simeoni M. 2018. Petri Nets for Modelling and Analysing Trophic Networks. *Fundamenta Informaticae*. 160(1 2), p. 27 52.

Beltrame C., Cohen-Shacham E., Trouillet M., & Guillet F. 2013a. Exploring the links between local management and conservation applying the ecosystem services concept: conservation and tourism service in Camargue, France. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*. 9(2), p. 166 177.

Bennett E.M., Cramer W., Begossi A., Cundill G., Díaz S., Egoh B.N., Geijzendorffer I.R., Krug C.B., Lavorel S., Lazos E., Lebel L., Martín-López B., Meyfroidt P., Mooney H.A., Nel J.L., Pascual U., Payet K., Harguindeguy N.P., Peterson G.D., Prieur-Richard A.-H., Reyers B., Roebeling P., Seppelt R., Solan M., Tschakert P., Tscharntke T., Turner B., Verburg P.H., Viglizzo E.F., White P.C., & Woodward G. 2015. Linking biodiversity, ecosystem services, and human well-being: three challenges for designing research for sustainability. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 14, p. 76 85.

Berkes, F., and C. Folke, editors. 1998. *Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience*. Cambridge University Press, New York.

Blondel J., Barruol G., Vianet R. 2013. *Encyclopédie de la Camargue*. Buchet Chastel, Paris.

Boutron O., Bertrand O., Fiandrino A., Höhener P., Sandoz A., Chérain Y., Coulet E., & Chauvelon P. 2015. An Unstructured Numerical Model to Study Wind-Driven Circulation Patterns in a Managed Coastal Mediterranean Wetland: The Vaccarès Lagoon System. *Water*. 7(11), p. 5986 6016.

Bullock A. & Acreman M. 2003. The role of wetlands in the hydrological cycle. *Hydrology and Earth System Sciences*. 7(3), p. 358 389.

Chauvelon P., Tournoud M.G., & Sandoz A. 2003. Integrated hydrological modelling of a managed coastal Mediterranean wetland (Rhône delta, France): initial calibration. *Hydrology and Earth System Sciences*. 7(1), p. 123 132.

Chazée L. [s d]. *Situation socioéconomique et tendances dans les pays méditerranéens*. p. 82.

Chazel L., Chazel M., 2013. *Camargue – Un écosystème entre terre et eau, Guide Pratique*, Paris.

Cheiron A., Chérain Y., Vandewalle P., Bricault B., Gibert M., Paliard V. et Befeld S., 2016. *Plan de gestion 2016-2020 de la Réserve Naturelle Nationale de Camargue – Diagnostic de la Réserve (A)*. Société nationale de protection de la nature – Réserve Naturelle Nationale de Camargue, p.189.

- Cohez D., Paix L., Gabrie L. & Olivier A., 2016 – Plan de gestion 2016-2020 de la Réserve Naturelle Régionale de la Tour du Valat. Tour du Valat, p. 84.
- Colding J., Barthel S. 2019. Exploring the social-ecological systems discourse 20 years later. *Ecology and Society*, 24(1).
- Costa C. 2005. Atlas des espèces invasives présentes sur le périmètre du Parc naturel régional de Camargue. p. 220.
- Dervieux A. 2005. La difficile gestion globale de l'eau en Camargue (France) : le Contrat de delta. *VertigO*. (Volume 6 Numéro 3).
- Dunne J.A. [s d]. *The Network Structure of Food Webs*. , p. 61.
- Elifantz H, Tel-Or E., 2002. Heavy Metal Biosorption by Plant Biomass of the Macrophyte *Ludwigia Stolonifera*. *Water, Air and Soil Pollution* 141, 207-218.
- 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 - la revue électronique en sciences de l'environnement* 12 Numéro 1.
- Frontier S. *Ecologie générale ; Structure et fonctionnement de la biosphère*. Dunod, p. 576.
- Gaucherel C., Théro H., Puiseux A., & Bonhomme V. 2017. Understand ecosystem regime shifts by modelling ecosystem development using Boolean networks. *Ecological Complexity*. 31, p. 104 114.
- Geijzendorffer I.R., Martín-López B., & Roche P.K. 2015a. Improving the identification of mismatches in ecosystem services assessments. *Ecological Indicators*. 52, p. 320 331.
- Harrison P.A., Berry P.M., Simpson G., Haslett J.R., Blicharska M., Bucur M., Dunford R., Egoh B., Garcia-Llorente M., Geamăna N., Geertsema W., Lommelen E., Meiresonne L., & Turkelboom F. 2014. Linkages between biodiversity attributes and ecosystem services: A systematic review. *Ecosystem Services*. 9, p. 191 203.
- Heurtefeux H., Grosset S., & Valantin P.-Y. 2007. Une approche alternative de la gestion des risques côtiers, l'exemple de la petite Camargue. *Territoire en mouvement*. (1), p. 3 13.
- Lafond V., Cordonnier T., Mao Z., & Courbaud B. 2017a. Trade-offs and synergies between ecosystem services in uneven-aged mountain forests: evidences using Pareto fronts. *European Journal of Forest Research*. 136(5 6), p. 997 1012.
- Laterra P., Barral P., Carmona A., & Nahuelhual L. 2016. Focusing Conservation Efforts on Ecosystem Service Supply May Increase Vulnerability of Socio-Ecological Systems. *PLOS ONE*. 11(5), p. e0155019.
- Lavoux T., Robinet O., Schmit P., Simon G. 2015. *Ecologiques et fonciers en Camargue*. Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable, rapport n° 00748801, p.77.
- Lefebvre G., Germain C., & Poulin B. 2015. Contribution of rainfall vs. water management to Mediterranean wetland hydrology: Development of an interactive simulation tool to foster adaptation to climate variability. *Environmental Modelling & Software*. 74, p. 39 47.

Malek Ž., Verburg P.H., R Geijzendorffer I., Bondeau A., & Cramer W. 2018. Global change effects on land management in the Mediterranean region. *Global Environmental Change*. 50, p. 238 254.

Mathevet R., 2004. *Camargue incertaine : sciences, usages et natures*. Buchet-Chastel, Paris.

McLaughlin D.L., Cohen M.J., 2013. Realizing ecosystem services: wetland hydrologic function along a gradient of ecosystem condition. *Ecological applications* : Ecological society of America 23, Issue7, 1619-1631.

Millennium Ecosystem Assessment (Program), éd. 2005. *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Washington, DC : Island Press, 137 p.

Mouret J.-C. 2004. Les potentialités agroclimatiques et la place du riz dans la dynamique d'évolution des systèmes de culture en Camargue. , p. 8.

Nguyen G. & Purseigle F. 2012. Les exploitations agricoles à l'épreuve de la firme: L'exemple de la Camargue. *Études rurales*. (190), p. 99 118.

van Oudenhoven A.P.E., Schröter M., Drakou E.G., Geijzendorffer I.R., Jacobs S., van Bodegom P.M., Chazee L., Czúcz B., Grunewald K., Lillebø A.I., Mononen L., Nogueira A.J.A., Pacheco-Romero M., Perennou C., Remme R.P., Rova S., Syrbe R.-U., Tratalos J.A., Vallejos M., & Albert C. 2018. Key criteria for developing ecosystem service indicators to inform decision making. *Ecological Indicators*. 95, p. 417 426.

Petit D. & Rivière-Honegger A. 2006. Processus territoriaux et gestion de l'eau en Camargue gardoise. *Développement durable et territoires*. (Dossier 6).

Pilosof S., Porter M.A., Pascual M., & Kéfi S. 2017. The multilayer nature of ecological networks. *Nature Ecology & Evolution*. 1(4), p. 0101.

Pommereau F. [s d]. *Algebras of coloured Petri nets*. , p. 68.

Raynaud F. 2015. Les gardians de Camargue et leurs chevaux, patrimoine archivistique et photographique pour une étude historique. *In Situ*. (27).

Rockström J., Steffen W., Noone K., Persson Å., Chapin F.S.I., Lambin E., Lenton T.M., Scheffer M., Folke C., Schellnhuber H.J., Nykvist B., de Wit C.A., Hughes T., van der Leeuw S., Rodhe H., Sörlin S., Snyder P.K., Costanza R., Svedin U., Falkenmark M., Karlberg L., Corell R.W., Fabry V.J., Hansen J., Walker B., Liverman D., Richardson K., Crutzen P., & Foley J. 2009. Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society*. 14(2).

Rulleau B. 2016. *OBSERVATOIRE SOCIO-ECONOMIQUE DES USAGES DU LITTORAL ET DE LA MER EN 2013-2014*. , p. 81.

Schmitz O.J., *Resolving Ecosystem complexity*. 2010. Paperback, p.192, Princeton.

Schröter M., Albert C., Marques A., Tobon W., Lavorel S., Maes J., Brown C., Klotz S., & Bonn A. 2016. National Ecosystem Assessments in Europe: A Review. *BioScience*. 66(10), p. 813 828.

Segura L., Thibault M., Poulin B. 2018. *Les solutions fondées sur la nature dans les anciens salins de Camargue*. Tour du Valat, p.33.

SNPN. 2013. *Compte rendu scientifique 2013*. Réserve Naturelle de Camargue.

PNRC. 2013. Evolution de l'occupation du sol en Camargue en 20 ans (1991-2011), p. 36.

Villa F., Bagstad K.J., Voigt B., Johnson G.W., Portela R., Honzák M., & Batker D. 2014. A Methodology for Adaptable and Robust Ecosystem Services Assessment. PLoS ONE. 9(3), p. e91001.

Zedler J.B., Kercher S., 2005. WETLAND RESOURCES: Status, Trends, Ecosystem Services, and Restorability. Annual Review of Environment and Resources, Vol. 30, 39-74.