



Rapport de stage
Master 2 Biodiversité, Ecologie,
Evolution – Parcours Ecosystèmes et
Anthropisation (EA)



Facteurs influençant la présence des plantes aquatiques
dans les mares : étude à l'échelle départementale (Gers)



Stage réalisé du 1^{er} mars au 31 août 2022 au sein de l'ADASEA du Gers.

Stagiaire :

BLAU Laura

Référent académique :

ELGER Arnaud

Maître de stage :

SANCERRY Guillaume

Examineur :

TABACCHI Anne-Marie

Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier Guillaume Sancerry mon maître de stage pour sa confiance, sa pédagogie et son partage de connaissances lors du stage.

Je pense également à remercier toutes les personnes travaillant à l'ADASEA, pour leur accueil au sein de l'association.

Je tiens aussi à remercier mon tuteur académique Arnaud Elger pour la rapidité de ses réponses et ses conseils lorsque que je l'ai sollicité.

Je n'oublie pas non plus tous les partenaires lors de cette étude et notamment François Prud'homme, mon référent au Conservatoire Botanique Nationale des Pyrénées, Midi Pyrénées (CBNPMP) pour ses conseils lors de l'élaboration du protocole de terrain et d'avoir pris le temps de déterminer les échantillons de plantes envoyés.

Egalement tous les gestionnaires auxquels j'ai eu affaire et notamment les agriculteurs et éleveurs pour leur gentillesse, leur temps et ce qu'ils m'ont appris de leur travail.

LISTE DES ANNEXES	2
RESUME	3
1 - INTRODUCTION	4
1.1 IMPORTANCE ET DISPARITION DES ZONES HUMIDES	4
1.1.1 <i>A l'échelle globale (rôles, causes, chiffres...)</i>	4
1.1.2 <i>Un exemple : les mares</i>	5
1.2 ÉCOLOGIE DES PLANTES AQUATIQUES	6
1.2.1 <i>Les différentes catégories de plantes aquatiques</i>	6
1.2.2 <i>Importance écologique</i>	7
1.2.3 <i>Facteurs principaux de contrôle</i>	7
1.2.4 <i>Déficit de connaissances sur ce groupe</i>	9
1.3 PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DU STAGE.....	9
2 - MATERIELS ET METHODES	9
2.1 PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL.....	9
2.2 JEU DE DONNEES INITIALES ET TRAVAUX PRELIMINAIRES	10
2.3 SITES D'ETUDE	10
2.3.1 <i>Type de sites</i>	10
2.3.2 <i>Nombre d'échantillons</i>	11
2.3.3 <i>Localisation et tirage aléatoire</i>	11
2.4 ECHANTILLONNAGE DE LA VEGETATION	12
2.5 PARAMETRES RELEVES.....	13
2.5.1 <i>Morphométrie</i>	13
2.5.2 <i>Physico-chimie</i>	13
2.5.3 <i>Sols et occupation du bassin versant</i>	15
2.5.4 <i>Facteurs de dégradations</i>	15
2.6 ANALYSES STATISTIQUES.....	16
3 - RESULTATS	17
3.1 DESCRIPTIF DE LA VEGETATION ET DES SITES	17
3.2 CHIMIE DES EAUX.....	18
3.3 VARIABLES ENVIRONNEMENTALES	19
3.4 ANALYSE DE CO-STRUCTURE	21
4 - DISCUSSION	23
5 - CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	26
6 - BIBLIOGRAPHIE	29
7 - ANNEXES	33

Liste des annexes

Annexe 1. Les missions de la CATZH en 2019-2020

Annexe 2. Compte rendu de la réunion avec François Prud'homme (CBNPMP) discutant de différents points du plan d'échantillonnage.

Annexe 3. Carte du tirage aléatoire des mares sur le département du Gers, en fonction des grands types de sols.

Annexe 4. Liste des espèces gardées dans l'étude (plantes aquatiques rhizophytes)

Annexe 5. Fiche terrain élaborée pour le projet.

Annexe 6. Paramètres chimiques mesurés en laboratoire dans chaque mare prospectée, leurs méthodes de mesures ainsi que leurs limites de quantification.

Annexe 7. Fiche enquête gestionnaire.

Annexe 8 : Matrice des corrélations par la méthode Spearman entre les variables liées à la chimie de l'eau.

Annexe 9. Cercle des corrélations entre les axes 1 et 2 de l'ACP réalisé sur les variables environnementales autres que celles relatives à la chimie de l'eau.

Annexe 10. Résultats de l'AFC sur les espèces les plus représentées dans les données, incluant le *Potamogeton bertcholdii* et sa contribution à l'axe 1, qui n'ont pu être interprétés.

Résumé

Les plantes aquatiques jouent un rôle essentiel dans les écosystèmes auxquels elles appartiennent (production primaire, zones de refuges et de reproduction pour de nombreuses espèces...). Malgré leur fort intérêt écologique, ce groupe de plantes est encore trop peu connu. Cette étude a eu pour objectif de déterminer les principaux facteurs déterminant la présence et la répartition des plantes aquatiques enracinées dans les mares. Pour cela 102 mares ont été prospectées dans tout le département du Gers, pour y recenser ces espèces et y relever les caractéristiques physico-chimiques de la mare et les caractéristiques de son environnement proche. Les analyses statistiques ont montré que le facteur principal influençant leur présence était la turbidité ; la présence de poissons et d'écrevisses étant également un frein à leur développement. L'ombrage a montré une relation négative mais non significative avec leur recouvrement, mais son influence est largement sous-estimée au vu de la méthode d'estimation et de ses variations journalières. Les nutriments, quant à eux ne sont pas ressortis comme ayant une influence avec les données de cette étude. Cependant, au vu de la complexité et du nombre élevé de facteurs d'influence, il reste nécessaire de poursuivre les études sur l'amélioration des connaissances sur les plantes aquatiques. Les résultats obtenus permettront d'améliorer les conseils de gestion et de restauration des points d'eau en vue de favoriser la présence et le développement des plantes aquatiques qui sont d'un intérêt écologique fort.

Abstract

Aquatic plants play an essential role in the ecosystems to which they belong (primary production, refuge and reproduction areas for many species...). Despite their strong ecological interest, this group of plants is still not well known. This study aimed to determine the main factors determining the presence and distribution of rooted aquatic plants in ponds. For this purpose, 102 ponds were surveyed throughout the Gers department, in order to identify these species and to record the physico-chemical characteristics of the pond and the characteristics of its immediate environment. Statistical analyses showed that the main factor influencing their presence was turbidity; the presence of fish and crayfish also being a brake on their development. Shading showed a negative but not significant relationship with their recovery, but its influence is largely underestimated because of the estimation method and these daily variations. Nutrients were not found to have any influence with the data from this study. However, in view of the complexity and the high number of influencing factors, there is still a need for further studies to improve the knowledge of aquatic plants. The results obtained will help improve management and restoration advice for water points in order to promote the presence and development of aquatic plants, which are of great ecological interest.

1 - Introduction

1.1 Importance et disparition des zones humides

1.1.1 A l'échelle globale (rôles, causes, chiffres...)

Les zones humides sont des zones de transitions entre les environnements terrestres et aquatiques et possèdent des caractéristiques des deux écosystèmes. Bien qu'elles peuvent être très variables en termes d'apparence et de composition d'espèces, la submersion par l'eau, qu'elle soit totale ou partielle, est la caractéristique commune entre ces environnements (Keddy, 2010). Cette submersion des terres, la salinité de l'eau et la composition en nutriments sont sujettes à des variations journalières, saisonnières et annuelles. Ces variations sont à l'origine de de sols particuliers, dominés par des processus anaérobiques (sans oxygène) qui, en retour, force la faune et la flore, particulièrement les plantes aquatiques à s'adapter aux inondations (Eau France, 2020).

Les zones humides sont riches en biodiversité et ont une forte valeur écologique, économique et sociale de par les nombreux services qu'elles fournissent aux sociétés humaines (**Figure 1**). En effet, elles jouent un rôle important notamment pour la réserve en eau, la séquestration du carbone, les régulations hydrologiques, le contrôle de l'érosion et le support de nombreux secteurs de production (Costanza *et al.*, 2014; de Groot *et al.*, 2012; Russi *et al.*, 2013).

Services	Comments and Examples
Provisioning	
Food	production of fish, wild game, fruits, and grains
Fresh water*	storage and retention of water for domestic, industrial, and agricultural use
Fiber and fuel	production of logs, fuelwood, peat, fodder
Biochemical	extraction of medicines and other materials from biota
Genetic materials	genes for resistance to plant pathogens, ornamental species, and so on
Regulating	
Climate regulation	source of and sink for greenhouse gases; influence local and regional temperature, precipitation, and other climatic processes
Water regulation (hydrological flows)	groundwater recharge/discharge
Water purification and waste treatment	retention, recovery, and removal of excess nutrients and other pollutants
Erosion regulation	retention of soils and sediments
Natural hazard regulation	flood control, storm protection
Pollination	habitat for pollinators
Cultural	
Spiritual and inspirational	source of inspiration; many religions attach spiritual and religious values to aspects of wetland ecosystems
Recreational	opportunities for recreational activities
Aesthetic	many people find beauty or aesthetic value in aspects of wetland ecosystems
Educational	opportunities for formal and informal education and training
Supporting	
Soil formation	sediment retention and accumulation of organic matter
Nutrient cycling	storage, recycling, processing, and acquisition of nutrients

* While fresh water was treated as a provisioning service within the MA, it is also regarded as a regulating service by various sectors.

Figure 1 ; Services écosystémiques fournies ou dérivés des zones humides (Finlayson *et al.*, 2005)

Cependant, malgré leur fortes valeurs écologique, économique et sociale, les zones humides font partie des écosystèmes les plus menacés. En effet, à l'échelle mondiale, leur disparition est estimée à 87% depuis les années 1700 avec des pertes près de 4 fois plus

rapides depuis le milieu du 20^{ème} siècle (Davidson, 2014). En France, on estime que la moitié ont disparu entre 1960 et 1990 (Bernard, 1994).

Le drainage agricole, la pollution, la pression démographique toujours plus forte, la demande croissante de tourisme et de loisirs ainsi que nos modes de productions sont autant de facteurs de disparition ou de dégradation de ces milieux (Bassi *et al.*, 2014 ; Fenner & Freeman, 2011).

Malgré la signature de la Convention de Ramsar sur les Zones Humides par 170 gouvernement internationaux en 1971, contenant des engagements politiques spécifiques pour maintenir et restaurer les zones humides et les services écosystémiques qu'elles fournissent, l'Indice d'Extension des Zones Humides (Wetland Extent Index) mesurant les tendances de la superficie des zones humides au cours du temps confirme que leur déclin continue à un taux rapide (Dixon *et al.*, 2016).

1.1.2 Un exemple : les mares

- *Réservoir de biodiversité*

Les mares sont de véritables réservoirs de biodiversité, tant bien au niveau de leur composition d'espèces que des services écosystémiques qu'elles fournissent (EPCN, 2008). Elles sont des habitats indispensables pour la survie de nombreuses espèces d'amphibiens et d'invertébrés qui y passent une partie de leur cycle de vie, y trouvant zones de refuge, de reproduction et d'alimentation. A l'échelle régionale, elles abritent une biodiversité unique et souvent plus riche que celles présentes dans les eaux courantes ou les lacs (Angelibert *et al.*, 2006, Williams *et al.*, 2004). Ce sont des éléments importants à l'échelle du paysage, améliorant la connectivité entre les autres habitats d'eaux douces en tant qu'écosystèmes-relais ou « stepping stone » (De Meester *et al.*, 2005). Ainsi, elles sont également importantes pour la faune sauvage, qui y retrouvent une source d'eau permanente et d'alimentation complémentaire, notamment dans les zones rurales.

Elles ont des fonctions écologiques importantes dans la régulation de la ressource en eau à l'échelle des bassins versants. Elles participent localement au captage d'une partie des eaux de ruissellement, luttant contre l'érosion des terres agricoles, à la réduction des surfaces inondées et à la restitution de l'eau lors des périodes d'étiage. Elles ont également une fonction essentielle dans la qualité de l'eau par leur rôle d'épuration, notamment en contexte agricole, où l'utilisation de produits phytosanitaires est parfois élevée (Bin *et al.*, 2018 ; Bouchard *et al.*, 1995).

- *Déclin des mares (changement d'usage)*

Les mares font depuis très longtemps l'objet d'un désintérêt et d'une forte pression anthropique qui conduit à une dégradation de la qualité de leurs eaux et de leur élimination plus ou moins rapide. On constate ainsi une importante baisse de la biodiversité dans ces habitats pourtant reconnus aujourd'hui comme indispensables (Sajaloli & Dutilleul, 2001).

En France et comme dans la plupart des pays d'Europe occidentale, le nombre de mares a drastiquement diminué depuis ces dernières décennies. Selon le pays, le pourcentage de diminution varie de 50 à 90% (EPCN, 2010) ce qui traduit bien l'ampleur du phénomène. La raison de ce déclin s'explique notamment par l'arrivée de l'eau courante dans

les foyers, et par l'évolution des politiques agricoles au cours du temps. En effet, ce phénomène a été accentué après la guerre où les exploitations en polycultures-élevage ont été réduites au profit des cultures de céréales, laissant à l'abandon une grande partie des mares servant à l'abreuvement du bétail, qui se sont naturellement comblées. Couplé à cela, le remembrement agricole, notamment dans les années 1970, a causé la destruction de nombreux éléments du paysage comme les haies et les mares pour faciliter le passage des engins mécanisés (Pelatan, 1993).

Ce phénomène concerne tout particulièrement les petits plans d'eau, alors que certains types de grands plans d'eau augmentent dans certaines régions (retenues sur cours d'eaux, gravières dans les plaines alluviales, lacs collinaires...) qui sont souvent très artificiels et avec un potentiel écologique faible (Williams *et al.*, 2004). Par ailleurs, les petits plans d'eau subsistants sont souvent très dégradés, notamment par la pollution des eaux, la présence d'espèces nuisibles et envahissantes ou par des sources de nuisance (Oertli *et al.*, 2013).

1.2 Ecologie des plantes aquatiques

1.2.1 Les différentes catégories de plantes aquatiques

Les « macrophytes » aquatiques sont définis comme des grands végétaux aquatiques (Spermaphytes, Bryophytes et Ptéridophytes) ainsi que les algues (Characées...) qui sont généralement visibles et identifiables à l'œil nu sur le terrain (Symoens *et al.*, 1982). Ils peuvent également être séparés en deux catégories selon la classification de Raunkiaer (1934), basée sur leurs formes de croissance et d'hivernage : les hélrophytes (ou plantes émergentes) dont les bourgeons de renouvellement sont situés dans la vase ou le sédiment avec un développement aérien de l'appareil végétatif, qui se distinguent des hydrophytes à savoir les « vraies » plantes aquatiques dont les organes de survie hivernaux ainsi que la totalité de l'appareil végétatif sont submergés (**Figure 2**). Selon les travaux de Den Hartog et Segal (1964) on distinguera dans les hydrophytes :

- Les végétaux non fixés, nageant ou **flottants** (pleustophytes) ;
- Les végétaux fixés dans le sédiment, à feuillages submergés ou **hydrophytes submergés** ;
- Les végétaux fixés dans le sédiment, à feuillages flottant ou **hydrophytes à feuilles flottantes**.

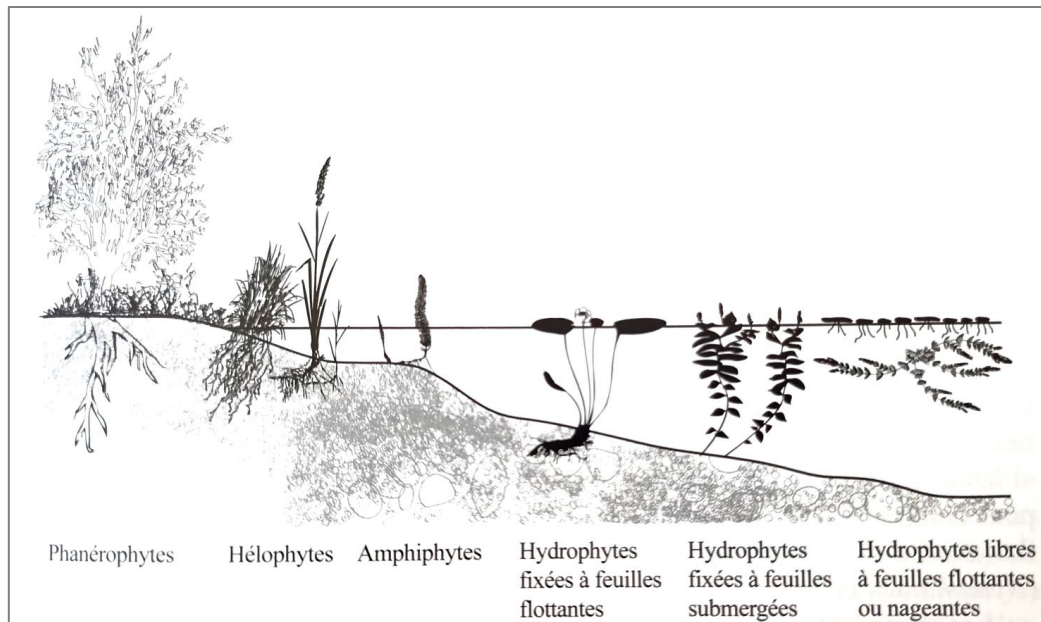


Figure 2 : Les différents groupes de végétaux se développant au sein et à proximité d'une mare (Oertli *et al.*, 2013).

Dans la suite de ce rapport, le terme « plante aquatique » sera utilisée uniquement pour discuter des « vraies » plantes aquatiques, à savoir les hydrophytes.

1.2.2 Importance écologique

Les plantes aquatiques jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement des écosystèmes auxquels elles appartiennent. En effet, en plus de constituer la base principale de la production primaire des hydrosystèmes, elles permettent une stabilisation des sédiments et filtrent les particules en suspension dans l'eau ou contenues dans les sédiments (incluant les polluants). De plus, certaines espèces forment des herbiers aquatiques, qui supportent une riche biodiversité en fournissant habitats, ressources alimentaires ainsi que zones de reproduction pour de nombreuses espèces (invertébrés, poissons, oiseaux... ; Dutartre, 2002).

. Les macrophytes sont très sensibles à leur environnement et sont influencés par de nombreux facteurs physiques (profondeur, turbidité...), chimiques (qualité de l'eau...) et biologiques (compétition...). Ainsi, ils sont intégrateurs des changements de la qualité de leurs habitats (pollution, réchauffement, eutrophisation...) et sont, à ce titre, considérés comme des bioindicateurs, c'est-à-dire qu'ils permettent de caractériser l'état d'un écosystème et de mettre en évidence leurs modifications naturelles ou provoquées (Carbanier et al, 1990 ; Ceschin et al, 2010). La structure des communautés va refléter l'influence des conditions locales (pH, conductivité, surface...) tout comme les processus à l'échelle régionale (Lacoul & Freedman, 2006).

1.2.3 Facteurs principaux de contrôle

A ce jour, les connaissances sur les facteurs environnementaux qui influencent la distribution des plantes aquatiques sont encore limitées. Ces facteurs vont avoir un impact sur la biodiversité de l'habitat à différentes échelles, allant de l'échelle régional à l'échelle local (**Figure 3**) et donc agir comme des filtres de sélection sur le pool d'espèces local (Gaston & Blackburn, 2000 ; Heino *et al.*, 2009).

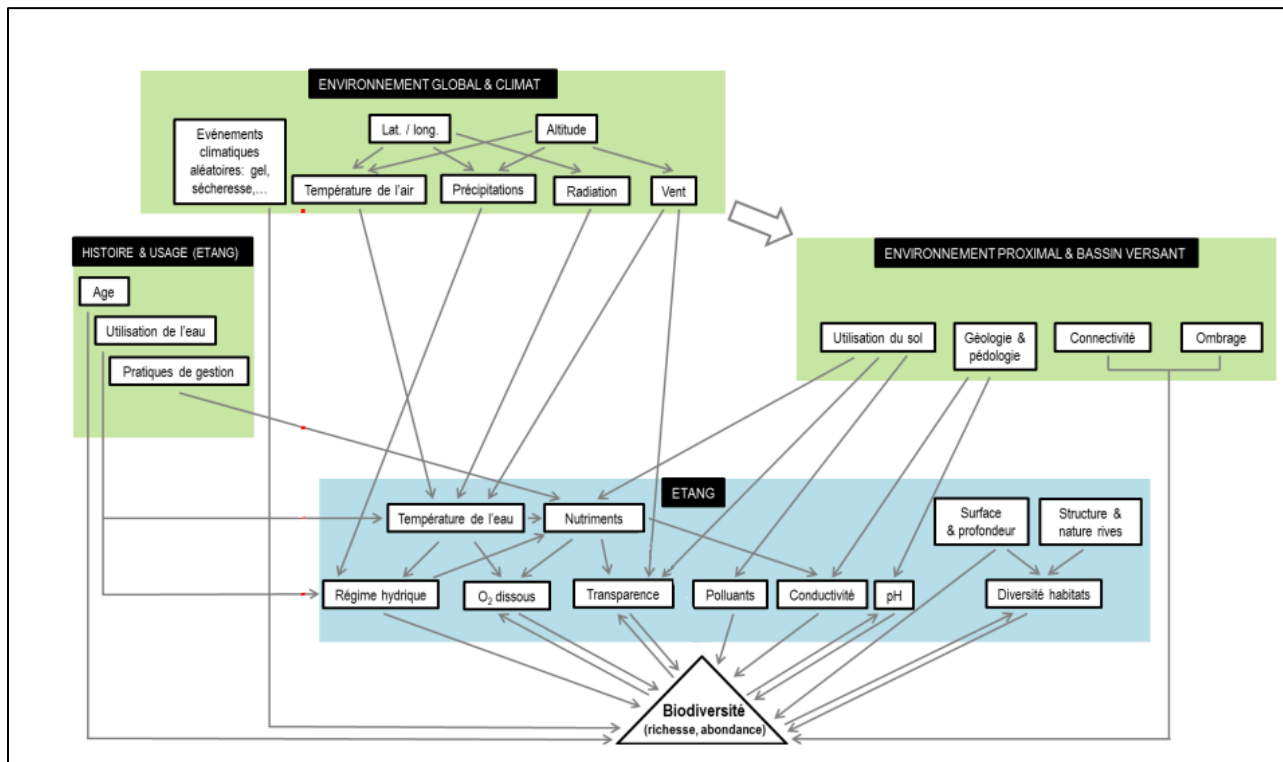


Figure 3 : Principales variables locales et régionales agissant (directement ou indirectement) potentiellement sur la biodiversité (Rosset, 2011).

Il est tout de même reconnu que les plantes aquatiques, comme tous les organisme bio-indicateurs vont répondre à 4 grandes catégories de facteurs :

Les *facteurs climatiques* dont le plus important est la température (à la fois de l'eau et du sédiment) car elle va affecter un grand nombre de processus physiologiques, tels que le métabolisme, la photosynthèse, le taux de croissance ou la germination des graines par exemple (Brönmark & Hansson 2000). De plus, chaque espèce ayant son propre spectre thermique, la température est un déterminant clé de la répartition des espèces à l'échelle mondiale (Begon *et al.*, 2006). L'altitude et la latitude jouent également un rôle dans leur distribution du fait de conditions climatiques très différentes. En effet, des habitats de hautes latitudes ont des conditions climatiques relativement extrêmes (hivers froids, gel...) limitant la biodiversité des plantes aquatiques (Lacoul & Freedman, 2006), tout comme les habitats d'altitudes élevées (Capers *et al.*, 2009).

Les *facteurs physiques* du milieu et plus particulièrement par la géomorphologie du plan d'eau telle que la profondeur de l'eau, sa transparence ou les caractéristiques du sédiment. Ces facteurs vont directement influencer l'environnement physico-chimique (disponibilité en oxygène, toxicité...) qui, en retour aura un impact direct sur la faune et la flore, influençant la composition des espèces, leur distribution, leur abondance et la dynamique de succession des plantes aquatiques (Chappuis *et al.*, 2012 ; Mitsch & Gosselink, 2015).

Les *facteurs trophiques*, à savoir la quantité de ressources nutritives disponibles dans le milieu pour la croissance. En effet, bien qu'un grand nombre de nutriments soient impliqués dans la croissance des plantes, le carbone, l'azote et le phosphore sont les éléments clés nécessaires à la vie des plantes aquatiques, et leur disponibilité va déterminer la production

primaire de l'écosystème et les espèces dominantes (Dutartre, 2002). La végétation, telle que les plantes aquatiques émergentes s'adaptent à l'anoxie dans les sédiments, bien que l'anoxie exclue la plupart des espèces de plantes vasculaires (Oertli & Frossard, 2013).

Les facteurs biologiques et notamment les interactions telles que la compétition pour les ressources, la prédation par les herbivores, ainsi que les maladies (Lacoul & Freedman, 2006).

1.2.4 Déficit de connaissances sur ce groupe

Leur présence dans le milieu aquatique est le résultat d'interactions complexes entre différents facteurs environnementaux et leurs caractéristiques propres. Cependant, les connaissances scientifiques sur l'écologie des plantes aquatiques sont limitées et loin d'être complètes (Dutartre, 2002).

De plus, dès que ces espèces sont jugées trop importantes par les usagers ou les gestionnaires, elles sont uniquement considérées comme des nuisibles, sans tenir compte de leur rôle écologique. Cette perception peut conduire à une gestion inappropriée des plantes, ce qui semble être le cas depuis de nombreuses années, au vu du nombre élevé de problèmes. Ainsi, il semble nécessaire d'améliorer les connaissances sur ces groupes de plantes afin de comprendre leur fonctionnement, leur rôle dans l'environnement et ainsi adapter les méthodes de gestion (Oertli & Frossard, 2013).

1.3 Problématique et objectifs du stage

Ainsi, la problématique de ce stage se place dans cette problématique d'amélioration des connaissances sur les plantes aquatiques. Le succès des plans de conservation requière une compréhension en amont des facteurs responsables de la distribution des plantes aquatiques.

Un programme d'amélioration des connaissances de répartition des plantes aquatiques mené par le Conservatoire botanique national des Pyrénées, Midi-Pyrénées (CBNPMP) a déjà été lancé à une échelle régionale en 2017 et s'est terminé en 2018. L'ADASEA, forte de cette expérience, a souhaité quant à elle poursuivre ce projet, à une échelle départementale en améliorant cette fois-ci la connaissance sur les facteurs qui influencent cette répartition, notamment dans les mares. Ainsi, l'objectif de ce stage consiste à déterminer les facteurs principaux qui vont influencer la présence des végétaux aquatiques dans les points d'eau afin de favoriser leur présence ou leur installation. En effet, une meilleure compréhension de ces facteurs permettra d'améliorer les conseils de gestion et de restauration des points d'eau, encore théoriques.

2 - Matériels et Méthodes

2.1 Présentation de la structure d'accueil

L'Association de Développement, d'Aménagement et de Services en Environnement et Agriculture du département du Gers (ADASEA 32) est une association de loi de 1901 fondée en 1987 et agréée pour la protection de l'environnement depuis 2016, travaillant dans les domaines de l'agro-environnement et l'aménagement du territoire et dont le siège social est situé à Auch. Elle offre son expertise et accompagne le monde agricole dans des perspectives

de développement rural et de conservation de la biodiversité. Dans ce contexte, elle combine maintien d'une activité agricole extensive et durable ainsi que préservation de l'environnement. Elle travaille aussi avec de nombreux gestionnaires des milieux naturels et anime la Cellule d'Assistance Techniques aux Zones Humides et également certains sites Natura 2000 du département, faisant de l'environnement et de la biodiversité des objets de cohésion rurale et agricole.

La CATZH 32, pôle dans lequel s'est effectué mon stage a pour but de préserver les milieux humides en encourageant des pratiques durables et compatibles avec le maintien de leurs fonctionnalités et leur biodiversité. C'est un outil de proximité basé sur le volontariat des gestionnaires (agriculteurs, propriétaires, collectivités...). Elle assure plusieurs missions (**Annexe 1**) telles que les diagnostics de zones humides, qui permettent d'apporter des conseils précis au travers de plan de gestion. La CATZH travaille aussi à la restauration des zones humides en accompagnant directement les gestionnaires ou les partenaires locaux (fédération de chasse, de pêche, syndicats de rivières, lycées agricoles).

Enfin la CATZH permet de sensibiliser les gestionnaires des milieux humides et le grand public à l'importance de ces zones par l'intermédiaire de diverses animations, journées techniques, documents de communication papier ou numérique.

2.2 Jeu de données initiales et travaux préliminaires

Les données initiales, fournies par la CATZH 32, le CBNPMP et l'Association Botanique Gersoise (ABG) contenaient les prospections de plantes aquatiques dans différents points d'eau du département du Gers (des années 1970 à février 2021). Ces couches de données ont été réunies en une seule et harmonisées, servant de point de départ pour le choix des sites à prospector. Au vu du nombre conséquent de données, il a fallu les trier afin de n'en garder qu'une partie. Le filtre s'est effectué sur trois catégories de critères : le type de point d'eau, le type de plantes aquatiques ainsi que la date de prospection.

A partir de cette nouvelle base de données, il a fallu élaborer un plan d'échantillonnage pour déterminer les sites à prospector, leur nombre et avec quel protocole. Cette phase de préparation de terrain s'est accompagnée de plusieurs échanges avec François Prud'homme (botaniste phytosociologue), notre référent au CBNPMP (compte rendu de la réunion en **Annexe 2**).

2.3 Sites d'étude

2.3.1 Type de sites

Au vu des moyens financiers et matériels, il a été choisi de ne se focaliser que sur un type de points d'eau, à savoir les eaux stagnantes, qui ont un fonctionnement et un régime hydrique très différents des systèmes d'eaux courantes (rivières...), et plus particulièrement sur les mares, plus facile à prospector par leur plus faible profondeur et superficie par rapport aux lacs et étangs.

Il n'existe pas de définition juridique propre à la mare, elle fait partie des zones humides définies par la loi sur l'eau du 03/01/1992 comme des « terrains exploités ou non,

habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire ». La définition de la mare qui a été retenue dans ce projet est celle de Sajaloli & Dutilleul (2001) : « La mare est une étendue d'eau de formation naturelle ou anthropique, permanente ou temporaire, à renouvellement généralement limité, de taille variable pouvant atteindre un maximum de 5000m². Sa faible profondeur, qui peut atteindre environ 2m, permet à toutes les couches d'eau d'être sous l'action du rayonnement solaire, ainsi qu'aux plantes de s'enraciner sur tout le fond ». Ainsi, l'étang se distingue de la mare par sa superficie plus grande (5000m² à 5ha) et sa plus grande profondeur (jusqu'à 8 mètres ; Oertli *et al*, 2000)

2.3.2 Nombre d'échantillons

Au niveau du nombre de mares à prospector, il a été choisi d'en faire une centaine car malgré qu'il n'y ai pas de règles concernant le nombre minimal d'échantillons pour des analyses statistiques multivariés, c'est un chiffre qui revient souvent et plus le nombre de données est important, plus on pourra retirer des tendances écologiques. L'objectif principale du stage étant de déterminer les principaux facteurs qui vont influencer la présence des espèces de plantes aquatiques et donc, d'améliorer la connaissance sur leur préférence écologique, une autre question qui peut entrer en jeu dans ce sujet est de savoir pourquoi une mare n'est pas végétalisée. Il a été choisi donc de prendre cette question en considération, mais de lui donner moins de poids. Ainsi l'objectif était de prospector 75 mares végétalisées et 25 mares non végétalisées, le jeu de données final en contient finalement 76 et 26.

Par ailleurs, au vu de la courte période de stage et du coût des déplacements, il a été choisi de ne faire qu'une prospection par mare et d'avoir une plus grande diversité de sites plutôt que de réduire le nombre de mares pour faire plusieurs prospections à intervalles réguliers. Ces choix se sont également décidé avec François Prud'homme.

2.3.3 Localisation et tirage aléatoire

La chimie de l'eau étant fortement conditionné par la nature minéralogique du substrat, les mares ont été sélectionnées par tirage aléatoire en fonction des différents types de sols du département du Gers. L'objectif étant d'améliorer les connaissances sur les plantes aquatiques, le tirage aléatoire s'est fait par pondération, à savoir en fonction de la quantité initiale de donnée dans chaque type de sol. Ainsi, le type de sol le moins courant dans le département a été moins prospecté que le type de sol prépondérant (sol argilo-calcaire).

Un pool de mares correspondant au tirage aléatoire a été tiré avant d'aller sur le terrain. Cependant, des réajustements ont dû être effectué au cours du stage et des mares ont été remplacées par d'autres mares. En effet, il est arrivé que certaines mares censées être végétalisées ne le soient pas et inversement. De plus, certaines mares tirées non pas pu être prospectées soit car le contact avec le gestionnaire n'a pu se faire ou bien faute de disponibilités de celui-ci. La carte des mares prospectées est présenté ci- dessous (**Figure 4**) et la carte du tirage aléatoire initiale est présentée en annexe (**Annexe 3**).

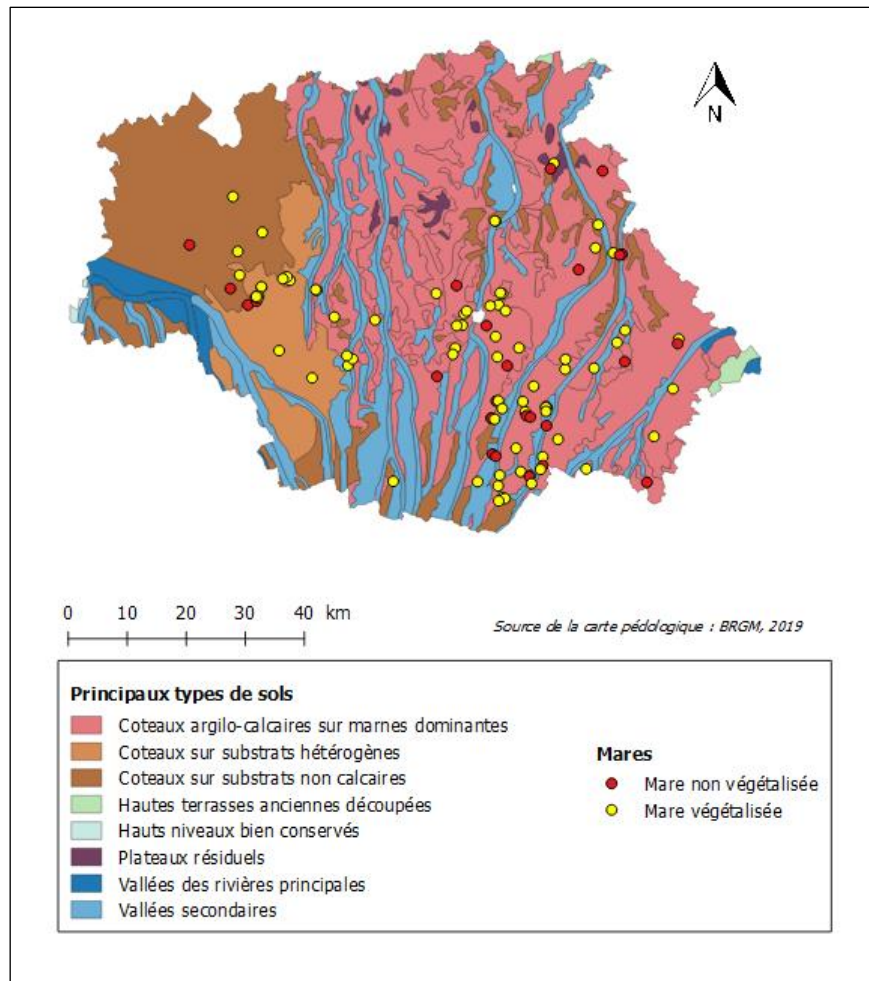


Figure 4 : Carte de la localisation des 102 mares prospectées sur le département du Gers, en fonction des grands types de sols. *Source de la carte pédologique : BRGM, 2019.*

2.4 Echantillonnage de la végétation

Le jeu de données étant assez élevé, il a été choisi de se focaliser premièrement sur les hydrophytes, et plus précisément sur les « rhizophytes », définis dans la classification de Luther (1949) comme les « *plantes dont les parties basales pénètrent dans le fond ou sont recouvertes par le substrat* » (Den Hartog & Segal, 1964) La prise en compte d'un groupe biologique et non pas d'un groupe d'espèces étant plus pertinente au vu de leur condition similaire de croissance et survie.

Cette définition des espèces d'intérêts a donc permis de trier les données initiales pour ne garder que les espèces répondant à ces définitions sur le département (**Annexe 4**). Il a également été choisi d'inclure le groupe des Characées dans l'analyse, du fait d'une répartition assez large sur le département, ainsi que de son intérêt écologique fort, et ses caractéristiques fonctionnelles similaires aux rhizophytes (hydrophytes enracinés formant des herbiers, support de biodiversité). La détermination des espèces ne pouvant pas se faire à l'œil nu car elle nécessite l'observation du cortex, il a été prélevé quelques pieds dans des bocalux sur le terrain pour pouvoir être ensuite être analysés grâce à la loupe binoculaire. Le livre utilisé pour la détermination est *le guide des Characées de France méditerranéenne* (Mouronval et al., 2015).

Pour les potamots à feuilles filiformes (*Potamogeton pusillus*, *Potamogeton bertcholdi*, ...), quelques pieds étaient envoyés par courrier à François Prud'homme (entre deux feuilles humides, placées dans un sac congélation sans air) pour une détermination ou une vérification de l'espèce.

A l'inverse, pour le groupe des *Callitriches*, la détermination à l'espèce ne s'est pas faite car trop délicate. En effet elle demande l'observation des fruits mûrs, des feuilles et parfois des étamines, avec une période de floraison très réduite (quelques jours). Ainsi, lorsqu'il en a été observé sur le terrain, il a seulement été noté « *Callitriches sp.* ».

Au vu de la faible surface des mares, il a été décidé de faire un inventaire exhaustif de la végétation, c'est à dire du centre de la mare jusqu'aux berges (équipée de waders quand nécessaire). De même, il a été décidé de ne pas relever le recouvrement de la végétation grâce à des échelles prédéfinies (ex : échelle de Braun-Blanquet) mais d'être le plus précis possible.

2.5 Paramètres relevés

2.5.1 Morphométrie

Le groupe de plantes choisi (rhizophytes) s'ancrant dans le sédiment, les caractéristiques physiques du sol de la mare sont donc également très importantes. En effet, leur alimentation est à la fois conditionnée par les nutriments présents dans la colonne d'eau mais également dans le sédiment. De ce fait, pour chaque mare, la profondeur moyenne de la colonne d'eau et de la vase à laquelle se trouvait les espèces d'intérêts ont été mesurées grâce à une mire de chantier prêtée par l'Office française de la Biodiversité du Gers. Pour cela 3 mesures différentes de chaque critère ont été effectuées dans les herbiers, à des points assez éloignés pour pouvoir calculer une moyenne.

Les autres paramètres morpho-métriques mesurés ou estimés sur la mare sont :

- Le pourcentage de berges en pentes douces (<45°) et abruptes (>45°)
- La surface de la mare calculée avec le logiciel QGIS, et compléter par des estimations terrain et des photos
- La nature des berges : naturelle (boisées, herbacées, nues) et artificielles

La fiche terrain élaborée pour le stage, contenant tous les paramètres relevés et mesurés est affichée en **Annexe 5**.

2.5.2 Physico-chimie

La disponibilité de la lumière sur la mare a été estimée en regardant la projection de la canopée sur la surface de l'eau au zénith.

La turbidité de l'eau était mesurée au début avec un disque de Secchi, qui a été malheureusement perdu en début de terrain lors de la prospection d'une mare forestière. N'ayant pas le matériel nécessaire et le temps de le refaire, il a fallu trouver une solution rapidement. C'est donc grâce à la mire, également noire et blanche qu'a été approximé la turbidité. La première graduation était prise comme repère, la mire était descendue le plus verticalement possible dans l'eau jusqu'à ce que la graduation repère disparaisse. Il suffisait ensuite de faire la différence entre la graduation à la surface de l'eau et la graduation repère

pour avoir la profondeur de pénétration de la lumière. Cette méthode étant moins précise que le disque de Secchi, notamment du fait que la mire ne pouvait pas être plongée totalement à la verticale, faute de visibilité, il a été choisi d'évaluer la turbidité en classes suite à un calcul qui est le suivant :

$$\text{Pénétration de la lumière dans l'eau} = \frac{\text{Profondeur moyenne à laquelle la mire disparaît}}{\text{Profondeur moyenne de la colonne d'eau}} * 100$$

Ainsi, en fonction du pourcentage obtenu, la turbidité a été déterminée comme suit :

Pénétration de la lumière	100 %	75 – 100%	50 – 75%	25 – 50%	< 25%
Classe de turbidité	« Nulle »	« Faible »	« Moyenne »	« Forte »	« Très forte »

Concernant le choix des paramètres physico-chimiques à mesurer, celui-ci s'est notamment décidé par rapport au financement et aux nombres d'échantillons à faire pour le projet. Au vu des nombreux devis réalisés avec divers laboratoires, il a été choisi de ne garder que les nutriments essentiels directement biodisponibles pour les plantes (nitrates, nitrites, ammonium et orthophosphates). De plus, il a semblé plus pertinent de ne garder que ceux-ci et d'effectuer le plus d'échantillons possibles, plutôt que moins mais avec plus de paramètres. Ainsi, les analyses ont été effectuées avec le laboratoire Public Labo – Site du Gers (anciennement nommé laboratoire départementale de l'eau) à Auch.

Un échantillon d'eau a donc été collecté dans chaque mare pendant la prospection et filtré sur place avant dépôt au laboratoire le soir. Pour cela, un échantillon d'eau de surface était prélevé au milieu de la mare dans un bocal de 500ml afin d'avoir les conditions chimiques les plus représentatives de l'ensemble. Cet échantillon était ensuite prélevé grâce à une seringue stérilisée avant d'être filtrée dans un récipient de 250 ml grâce à un support de filtre dans lequel était placé un filtre à membrane 0.45 µm X 47 mm (**Figure 5**). Le filtre devait être changé dès que le passage de l'eau montrait une résistance (filtre plein). Sur chaque échantillon filtré a été noté le numéro de la mare ainsi que la commune de prélèvement, et chaque échantillon a été stocké dans une glacière le temps de la journée de terrain avant d'être déposé au laboratoire jusqu'à 17h pour être mis en analyse. Les concentrations en nitrates (NO₃⁻, en µg/L), nitrites (NO₂⁻, en µg/L), ammonium (NH₄⁺, en µg/L) et en orthophosphates (PO₄³⁻, en µg/L) dissous ont été déterminés par différentes méthodes relatives aux normes AFNOR (**Annexe 6**).

La conductivité électrique de l'eau, c'est à dire la capacité de ses ions à conduire le courant électrique, donne une indication sur la quantité de sels minéraux dans l'eau (CEAEQ, 2018) ainsi que sur sa dureté (quantité de carbonate de calcium). Ce paramètre a été mesuré sur le terrain (µ.S.cm⁻¹) grâce à un conductimètre, Hanna Instrument. Pour cela, il suffisait de placer les électrodes du conductimètre dans l'eau jusqu'à stabilisation de la valeur (**Figure 6**).

Le pH quant à lui a été mesuré grâce à des bandelettes colorimétriques de la marque Pehanon, gradué en 0,5 d'un pH 4 à un pH 9. La bandelette devait être complètement submergée dans l'eau pendant 3 secondes avant lecture de la couleur (**Figure 7**).



Figure 5 (à gauche) : Photographie du filtrage d'un échantillon d'eau de mare sur place.

Figure 6 (au milieu) : Photographie d'une mesure de la conductivité de l'eau avec un conductimètre.

Figure 7 (à droite) : Photographie d'une mesure du ph avec une bandelette colorimétrique.

L'oxygène dissous ainsi que la température de l'eau, bien que deux éléments importants dans les processus biochimiques de la mare et les processus physiologiques des plantes n'ont pas été mesuré du fait de leurs trop grandes variations journalières.

2.5.3 Sols et occupation du bassin versant

Le bassin versant de la mare ainsi que sa pente ont été estimés sur le terrain, puis dessinés sur le logiciel QGIS (version 2.14) grâce à la lecture des courbes de niveaux des images cartographiques numériques du SCAN 25[®]. L'occupation des parcelles a été déterminée grâce aux fonds de carte du Registre Parcellaire Graphique (RPG) 2020 disponibles sur le site du géoportail (<https://www.geoportail.gouv.fr/>)

Afin d'avoir une estimation de la quantité d'intrants arrivant potentiellement à la mare, deux catégories de parcelles ont été gardées :

- Les parcelles de type forêt, prairie permanente et jardin, dont les ajouts de fertilisants sont considérés comme faibles voire nuls.
- Les cultures et les prairies temporaires, utilisant des engrais, bien que les quantités dépendent du mode de culture et des espèces cultivées.

Ainsi, le pourcentage de cultures et de prairies temporaires du bassin versant de chaque mare a été calculé pour être groupé dans la variable « culture ».

2.5.4 Facteurs de dégradations

Ces informations ont été relevées à la fois sur le terrain par observation mais également grâce à l'aide d'une enquête gestionnaire qui avait été élaborée pour le projet (**Annexe 7**), et qui a été réalisée pour chaque gestionnaire de mares, par téléphone ou en présentiel. Il s'agit notamment de la présence de bétail ou d'espèces animales sauvages qui viendraient s'abreuver dans la mare et qui pourraient dégrader les berges (sangliers, ragondins...),

d'espèces animales aquatiques telles que les poissons et les écrevisses exotiques (l'écrevisse à pattes blanches autochtone peuplant les cours d'eau) qui vont perturber l'écosystème de la mare, ainsi que de la présence d'oiseaux herbivores (canards, poules d'eau...). Il a également été noté le degré de piétinement des berges, si tel était le cas (faible, moyen, fort) et si les berges présentaient des phénomènes d'érosion.

Le recouvrement des espèces de roselières sur la surface de la mare a également été estimé. En effet, en plus d'entrer en compétition avec les plantes aquatiques pour certaines ressources, elles sont connues pour produire de grandes quantités de biomasse, qui vont participer à l'enrichissement et également au comblement du point d'eau. N'ayant pu analyser le phosphore et l'azote totaux en laboratoire, cela permettait également, dans une moindre mesure, d'avoir une idée du potentiel trophique de la mare. Les espèces concernées sont : *Phragmites australis* (Roseau commun) ; *Typha latifolia* (Massettes à larges feuilles) ; *Typha angustifolia* (Massettes à larges feuilles) ; *Sparganium erectum* (Rubanier d'eau) ; *Iris pseudachorus* (Iris des marais).

Le pourcentage de *Cypéracées* à la surface de la mare a aussi été relevé. Les espèces de cette famille ne produisent pas autant de matières organiques que les plantes de roselières mais peuvent aussi rentrer en compétition pour les ressources avec les plantes aquatiques. De la même manière le recouvrement en « lentilles d'eau » et en algues filamenteuses ont été relevés.

2.6 Analyses statistiques

- *Prétraitement des données*

Au vu du nombre important de facteurs différents récoltés et afin de diminuer le nombre de variables ajoutées dans l'analyse de l'ACP, les variables relatives aux caractéristiques des berges (nature et pente) ont été retirées car les plantes aquatiques se retrouvent dans l'eau. Seule le critère de piétinement, qui pourrait potentiellement avoir un impact sur la turbidité de l'eau et la profondeur de la vase a été gardé. Par le peu de précision et de fiabilité obtenues sur la présence réelle et régulière de mammifères sauvages ou d'oiseaux herbivores, ces variables n'ont également pas été retenues.

Les variables de présence de poissons et d'écrevisses ont été regroupées dans une seule variable « Fousseurs » du fait d'un petit nombre de données concernant ces facteurs et de leur impact relativement similaire sur les plantes aquatiques et le sédiment, afin d'en retirer des informations, bien que plus globales.

De la même manière, les variables relatives à la présence de végétaux compétiteurs ont été regroupées, à savoir les pourcentages de roselières, de cypéracées, d'algues filamenteuses et « lentilles » d'eau.

- *Analyse des données*

Les données récoltées sur les paramètres environnementaux ont d'abord été décrites grâce par des analyses en composantes principales normées afin d'observer les potentielles relations entre elles, ainsi que les paramètres influant le plus sur la surface végétalisée totale. Au vu du nombre important de variables, une première ACP a été effectuée sur les variables

chimiques de l'eau et les variables pouvant influencer cette chimie et une deuxième ACP a été effectué sur les caractéristiques morphologiques et environnementales de la mare.

Pour tester les corrélations entre les variables quantitatives, des tests de corrélation de Spearman ont été effectués (les données ne suivant pas une loi normale).

Une analyse de co-inertie a été effectuée entre le tableau floristique (recouvrement des espèces sur chaque mare) ainsi que le tableau des paramètres environnementaux relevés sur le terrain afin de mettre en évidence les principaux facteurs de contrôle à l'échelle d'une espèce. Les espèces considérées comme « rares », à savoir dont l'occurrence sur la totalité des mares végétalisées prospectées était inférieure à 5% (correspondant à un recensement sur un maximum de 3 mares) ont été retiré de l'analyse car elles biaisaient les tendances du fait de leur faible présence. La significativité du coefficient de corrélation vectorielle RV entre les deux tableaux a été testé grâce à une simulation de Monte-Carlo, basée sur des tests de permutations.

3 - Résultats

3.1 Descriptif de la végétation et des sites

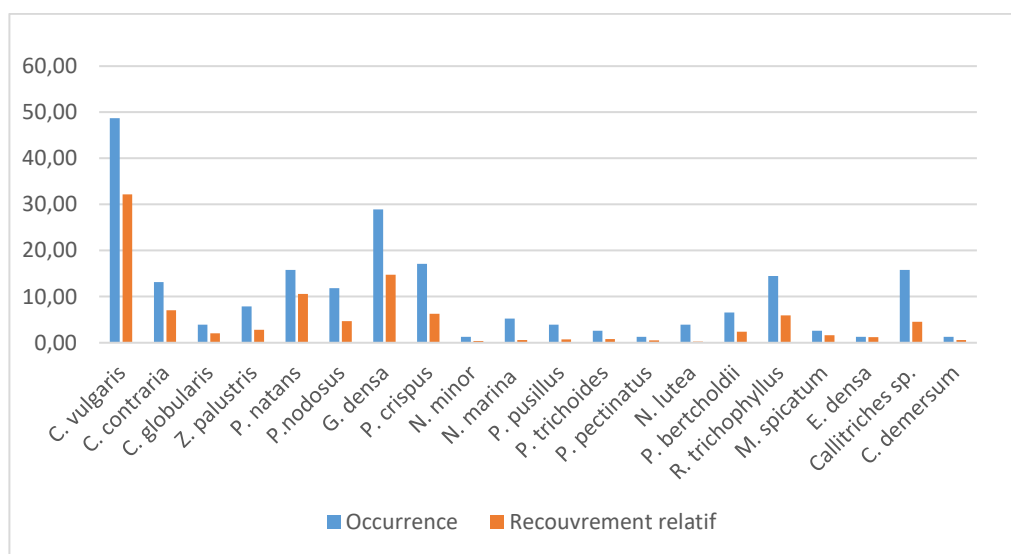


Figure 8 : Occurrence des espèces ainsi que leur recouvrement relatif sur la totalité des mares végétalisées prospectées (en pourcentage).

Les espèces les plus retrouvées sont dans l'ordre *Chara vulgaris* (48% des mares), *Groenlandia densa* (28%), *Potamogeton crispus*, *Potamogeton natans* et le groupe des *Callitriches*. (16%). Ce sont également ces espèces qui ont le plus grand recouvrement relatif (**Figure 8**).

Les espèces les plus rares (avec moins de 5% d'occurrence) sont : *Chara globularis*, *Najas minor*, *Potamogeton pusillus*, *Potamogeton trichoides*, *Potamogeton pectinatus*, *Myriophyllum spicatum*, *Egeria densa* et *Ceratophyllum demersum*.

Au niveau des sites, les trois quarts des mares prospectées se situant dans une parcelle de prairie (**Figure 9a**), viennent ensuite les mares situées en jardin (13%), les mares

en parcelles cultivées (8%) et mares forestières (4%). Les usages sont plus hétérogènes (**Figure 9b**) et se répartissent dans l'ordre décroissant comme suit : abreuvement (35%), sans usage particulier (27%), ornemental (24%), irrigation (13%) et une mare correspondant à un bassin de rétention des eaux d'orages.

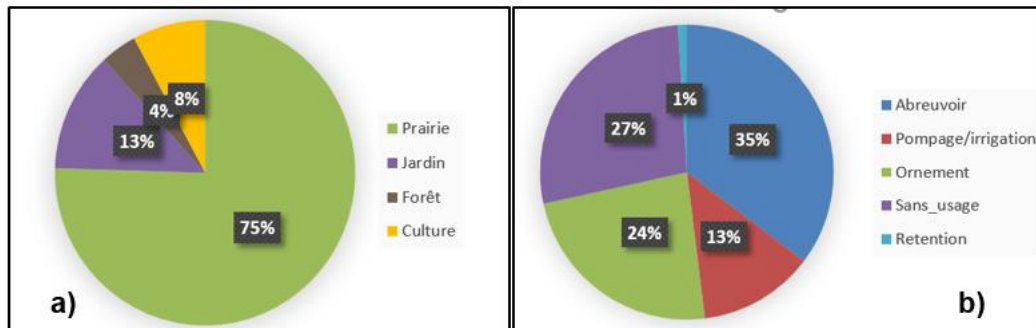


Figure 9 : Proportion des mares prospectées (a) en fonction du type de parcelle (prairie, jardin, forêt, culture) et (b) en fonction des usages.

3.2 Chimie des eaux

Les deux premiers axes de l'ACP synthétisent 39,9% de l'inertie totale de l'analyse sur facteurs chimiques, c'est-à-dire que 39,9% de la variance observée dans le tableau entre ces variables est expliquée par les deux premiers axes (**Figure 10**).

L'axe 1, portant le plus d'information (23,1%) montre la relation positive entre les variables correspondantes au pourcentage de parcelles cultivées dans le bassin versant, aux quantités de nitrites et de nitrates dans l'eau ainsi que la conductivité.

L'axe 2 quant à lui représente 16,8% de l'information et est principalement défini par les quantités d'orthophosphates, d'ammonium et le ph de l'eau, variables corrélées positivement entre elles.

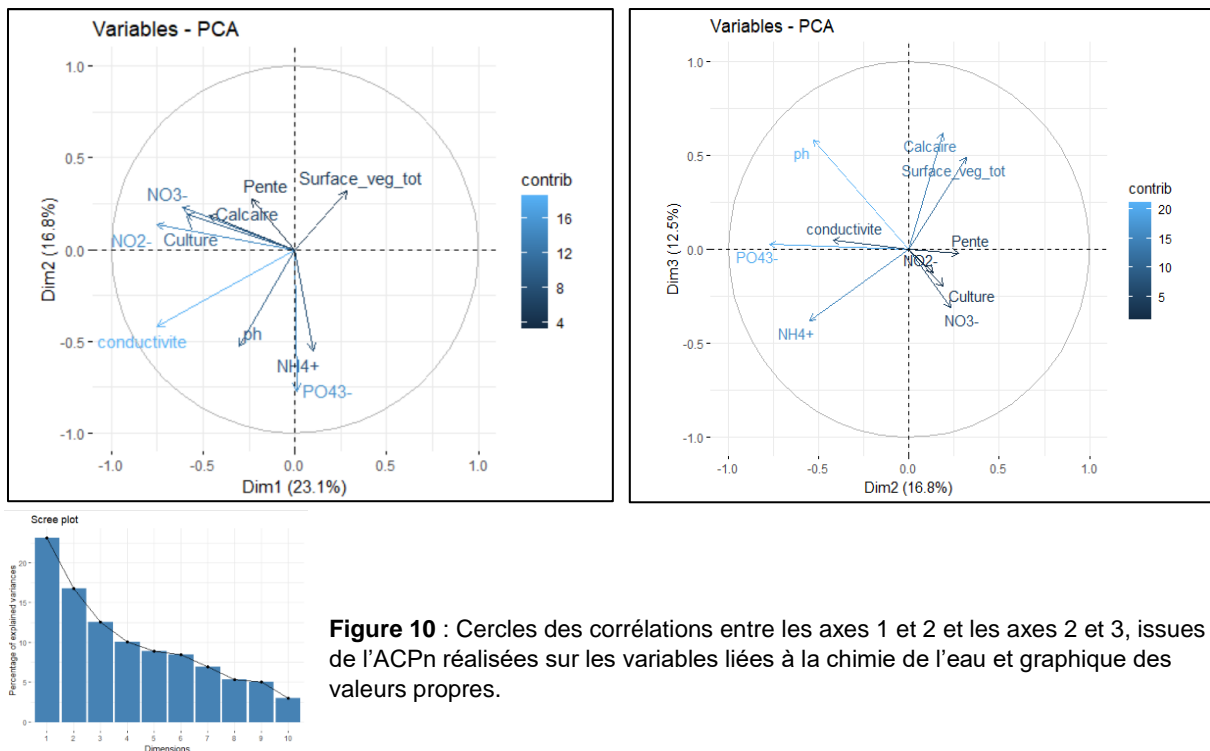


Figure 10 : Cercles des corrélations entre les axes 1 et 2 et les axes 2 et 3, issues de l'ACPn réalisées sur les variables liées à la chimie de l'eau et graphique des valeurs propres.

Ces tendances sont également vérifiées par les tests de corrélations de Spearman (**Annexe 8**). En effet, les quantités de nitrates sont fortement corrélées avec les quantités de nitrites (cor.test, rho = 0.759, p < 2.2 e-16), avec la valeur de la conductivité (cor.test, rho = 0.501, p = 7.935 e-08) et avec la proportion de cultures dans le bassin versant (cor.test, rho = 0.334, p = 5.989 e-04). Les quantités d'orthophosphates sont quant à elles bien corrélées avec les quantités d'ammonium, bien que faiblement (cor.test, rho = 0.219, p = 0.02692), et négativement corrélées avec la proportion de culture dans le bassin versant (cor.test, rho = -0.272, p = 0.005). Il apparaît également un relation négative significative entre le recouvrement des plantes aquatiques et l'ammonium (cor.test, rho = -0.318, p = 0.001).

3.3 Variables environnementales

Les valeurs propres de l'ACP réalisée sur les autres variables biotiques et abiotiques montrent que les l'information s'étale sur plusieurs axes et ne permet pas de tirer des corrélations marquées entre les différentes variables.

Le cercle des corrélations représenté est celui entre les axes 1 et 3 et entre les axes 1 et 4 (**Figure 11**), l'axe 2 montrant essentiellement la forte corrélation entre la présence de bétail et le piétinement des berges (**Annexe 9**).

Ainsi, l'axe 1 représente 21,4% des variations de facteurs entre les sites et montre les relations positives entre la profondeur de l'eau, sa turbidité, et la présence de fousseurs (poissons et écrevisses). Ces variables sont liées négativement à la présence de bétail et donc au degré de piétinement des berges.

L'axe 3, qui porte 12,3% de l'inertie montre que les variables profondeur de la vase et ombrage ont une influence négative sur la surface végétalisée totale. L'axe 4 quant à lui, ne

représente que 10,6% de l'inertie mais montre une relation négative entre le recouvrement des plantes aquatiques et la présence d'autres végétaux compétiteurs de la mare.

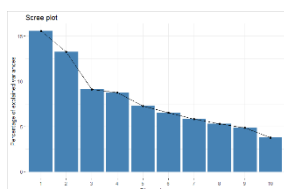
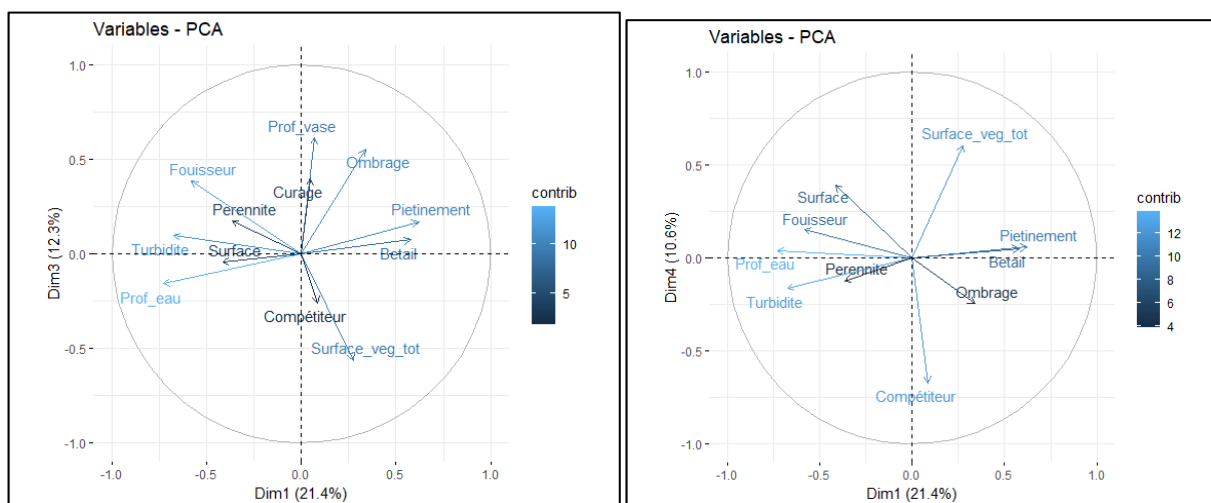


Figure 11 : Cercle des corrélations entre les axes 1 et 3 et entre les axes 1 et 4 issues de l'ACPn réalisée sur les variables relatives à la morpho-métrie et à l'environnement de la mare et graphique des valeurs propres.

Concernant les tests de corrélation sur la présence de végétaux et leur recouvrement sur la mare, c'est la turbidité qui semble avoir le plus d'influence négative (**Tableau 1**). En effet, elle a d'abord un effet sur la présence de plantes aquatiques (cor.test, rho = -0.44, p = 1.746^e-06), et lorsque ce n'est pas le cas, un effet négatif sur le recouvrement végétal de la mare (cor.test, rho = -0.37, p = 0.0006). La présence de « Fousseurs », suit cette même tendance avec d'abord un effet sur la présence puis sur le recouvrement, et a également un effet positif sur la turbidité de la mare (cor.test, rho = 0.326, p = 0.0008). A l'inverse, la disponibilité de la lumière à la surface de l'eau, modélisée par le pourcentage d'ombrage n'a d'effets significatifs, ni sur la présence, ni sur le recouvrement des végétaux aquatiques. Concernant la relation négative retrouvé avec la présence de « Végétaux compétiteurs », elle n'a pas été retrouvé statistiquement (cor.test, rho = -0.048, p = 0.6274)

Tableau 1 : Matrices des corrélations par la méthode Spearman entre la présence de végétaux, leur recouvrement sur la mare, ainsi que la turbidité, l'ombrage, la présence de « fousseurs » (poissons, écrevisses) ainsi que de végétaux compétiteurs.

	Fousseur	Presence	surface_veg_tot	Turbidite	ombrage	Compétiteur
Fousseur	1.00000000	-0.30443952	-0.25851322	0.32648868	-0.02314297	-0.08612258
Presence	-0.30443952	1.00000000	0.76392593	-0.44361155	-0.03514845	-0.14738937
Surface_veg_tot	-0.25851322	0.76392593	1.00000000	-0.36905566	-0.17808841	-0.04862494
Turbidite	0.32648868	-0.44361155	-0.36905566	1.00000000	-0.27470792	-0.04660957
Ombrage	-0.02314297	-0.03514845	-0.17808841	-0.27470792	1.00000000	-0.22729411
Compétiteur	-0.08612258	-0.14738937	-0.04862494	-0.04660957	-0.22729411	1.00000000

3.4 Analyse de co-structure

Les résultats de l'AFC effectuée sur les espèces n'ont pas sus être interprétés lorsque celle-ci contenait le *Potamogeton bertcholdii*. En effet, cette espèce contribue à plus de 92% à l'axe 1 (**Annexe 10**) qui l'isole totalement des autres, mais aucun facteur ne semble le justifier. En effet, cette espèce a été retrouvée dans des communautés végétales très variées (au même titre que d'autres espèces) : seule ou en mélange, à des recouvrements plus ou moins élevés et dans plusieurs mares aux caractéristiques différentes. Ainsi, les résultats de l'analyse de co-inertie ont été effectuée sans le *Potamogeton bertcholdii*.

Les axes 1 de l'ACP et de l'AFC sont bien représentés dans le plan de co-inertie, ce qui signifie que les variations observées dans les communautés floristiques sur cet axe s'expliquent plutôt bien par les variations environnementales de ces axes, également observable avec le graphique des valeurs propres où l'axe 1 porte la majorité de l'information (**Figure 12**).

On peut y observer quelques influences de facteurs à l'échelle individuelle, notamment pour le *Potamogeton natans* qui semble s'être plutôt retrouvé dans des eaux relativement turbides, profondes et éclairées, tendance également observé pour le *Potamogeton nodosus* mais dans une moindre mesure. A l'inverse le groupe des *Callitriches* a essentiellement été retrouvé dans des mares claires, de faibles profondeurs et ombragées.

Sur l'axe 2, il reste difficile de retirer des tendances, d'une part car dans la co-structure cet axe porte nettement moins d'informations, et d'autre part car l'axe 2 de l'ACP y est moins bien représenté. On peut tout de même observer que *Zannichellia palustris* semble avoir une préférence pour les mares peu profondes, servant d'abreuvoir et que le *Potamogeton crispus* s'isole des autres espèces sur cet axe de co-inertie, mais sans pouvoir le mettre en liaison avec les données environnementales.

Outre ces résultats, l'ACP sur toutes les variables réunies montre une relation positive entre la profondeur de la vase et les quantités de nitrates et nitrites dans l'eau.

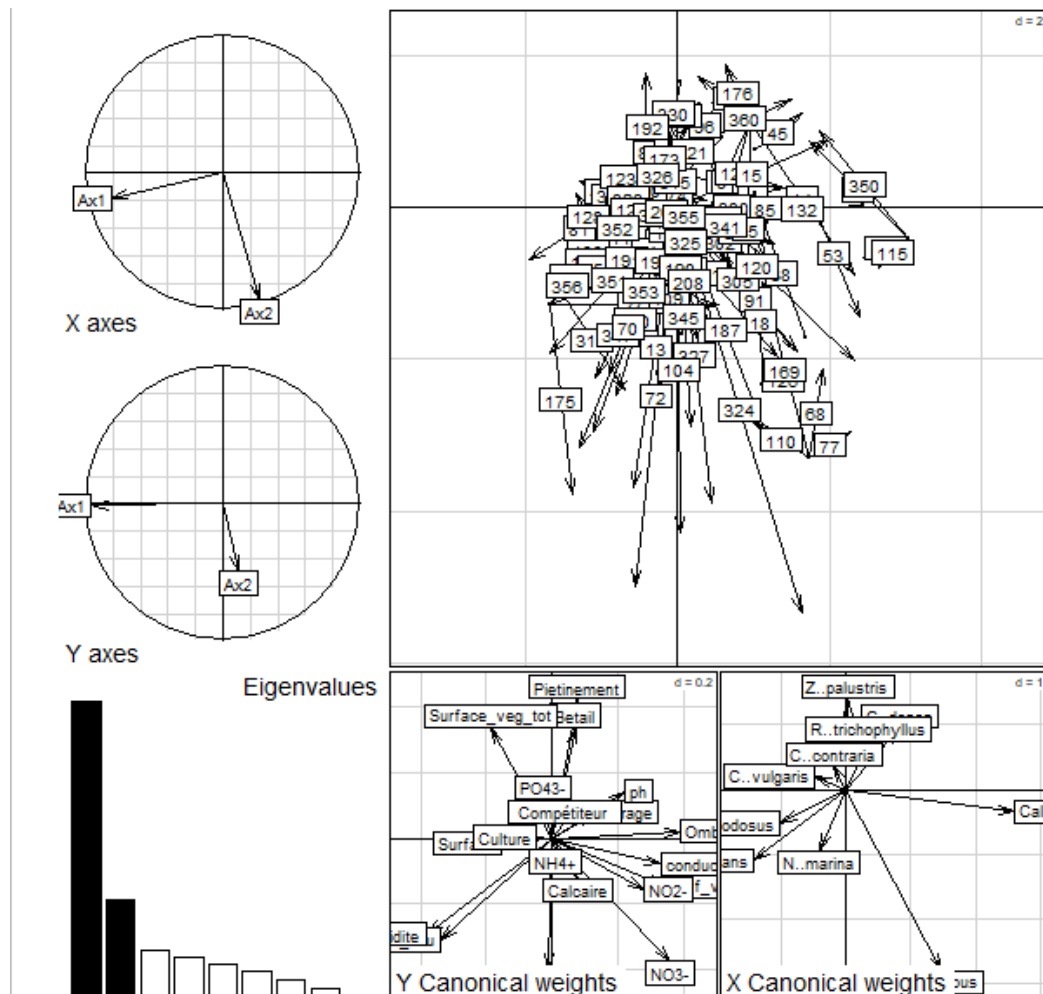


Figure 12 : Graphiques correspondant à l'analyse de co-inertie : Projection des axes de l'ACP et de l'AFC dans le plan de co-inertie ; graphique des valeurs propres ; représentation des sites, des espèces, et des variables environnementales dans le plan de co-inertie. (La variable effacée dans la représentation des facteurs environnementaux est la variable « Fousseurs » et l'espèce effacée dans la représentation de l'AFC est *Potamogeton crispus*).

Le coefficient RV, qui quantifie la co-structure entre le tableau floristique et le tableau des paramètres environnementaux est de 0,26 et est significatif (**Figure 13**, p.value = 0.0009). Cela signifie que 26% des variations de communautés floristique sont expliqués par les variations des paramètres du milieu.

```

Monte-Carlo test
Call: randtest.coinertia(xtest = coi, nrepet = 1000, fixed = 1)

Observation: 0.2613538

Based on 1000 replicates
Simulated p-value: 0.000999001
Alternative hypothesis: greater

      Std.Obs  Expectation  Variance
4.5532568608 0.1654930880 0.0004432379

```

Figure 13 : Résultats du test de Monte-Carlo, basée sur 1000 permutations aléatoires.

4 - Discussion

- Paramètres environnementaux

Les résultats obtenus ont montré que la turbidité était le facteur mesuré le plus impactant sur la présence et le recouvrement des plantes aquatiques. Ceci ne semble pas étonnant étant donné qu'il va conditionner la disponibilité de la lumière dans la colonne d'eau et donc l'énergie lumineuse disponible pour la photosynthèse des plantes et leur croissance. Cette turbidité de l'eau est d'autant plus grande lorsque la profondeur de l'eau est élevée, les rayons lumineux ayant une distance plus longue à parcourir pour atteindre le fond de la mare, par rapport à des mares de faibles profondeurs. Cette turbidité est inversement corrélée avec le piétinement des berges par le bétail ce qui ne vient pas à l'idée. Cependant, on pourrait l'expliquer par le fait que les mares servant d'abreuvoir sont généralement des mares permanentes, alimentées par des sources et donc à renouvellement d'eau constant. De plus, les animaux viennent s'abreuver en bordures des mares, sur de faibles surfaces, ils viennent s'abreuver en même temps, une à deux fois par jours (et seulement quelques semaines dans l'année) avec une sédimentation qui se fait donc assez rapidement, n'entraînant pas forcément une augmentation de la turbidité.

Un autre facteur influençant la disponibilité de la lumière pour les végétaux, est l'ombrage porté sur la mare. Ce facteur a montré une tendance négative sur la présence et le recouvrement des plantes aquatiques, mais qui n'a pas été vérifiée statistiquement. Cependant, c'est un paramètre qui reste difficile à évaluer du fait de ses variations journalières. En effet, la mesure de l'ombrage a été faite en regardant la projection de la canopée sur la mare au zénith et donc reflète seulement la disponibilité de la lumière à un moment donné de la journée. Des zones ombragées, au midi solaire, sont très probablement éclairées à d'autres instants de la journée. De plus, l'ombrage va dépendre de la structure de la mare et notamment de l'orientation des berges boisées et la structure des ligneux présents. Ainsi, l'influence de ce paramètre sur les plantes aquatiques est largement sous-estimée dans cette analyse et on peut supposer que son impact est plus important.

Ces résultats n'expliquent bien évidemment pas toute la variabilité entre les sites et ne montrent que les plus grandes tendances. De nombreux facteurs environnementaux vont venir influencer l'écosystème de la mare, facteurs ayant des variabilités à différentes échelles et des interactions complexes entre eux.

- Facteurs trophiques

Plus le bassin versant de la mare est riche en parcelles cultivées, plus les quantités de nitrates et de nitrites sont importantes dans l'eau. Ce résultat est à mettre en relation avec les engrais agricoles riches en azote minéral. Ces fortes quantités d'azote sont également corrélées positivement avec la conductivité, qui est une mesure des sels minéraux dissous dans l'eau, donc des nutriments, mais également les ions calcium. On retrouve d'ailleurs une relation positive entre le caractère calcaire du sol et la conductivité de l'eau.

A l'inverse, les quantités en orthophosphates, sont corrélées négativement avec la proportion de culture dans le bassin versant. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'une grande

partie des rejets de phosphore dans le domaine agricole sont liées aux activités d'élevage notamment avec l'épandage de fumier et aux zones de pâture. Cependant, ces quantités de phosphore dissous retrouvées dans les eaux des mares restent relativement faibles. En effet, ce nutriment essentiel à la croissance des plantes, et limitant dans les écosystèmes d'eaux douces pose surtout des problèmes d'eutrophisation dans les zones d'élevage intensifs, où les quantités d'effluents épandues sont importantes sur de longues périodes (Dourmad *et al.*, 2020), or le Gers reste un département avec un élevage encore assez extensif. Cependant, ces résultats ne représentent qu'une partie de la quantité de nutriments réellement présentes dans la mare, une partie (et notamment le phosphore) peuvent précipiter dans la mare et donc être disponibles pour la croissance des plantes via les racines mais également par une remise en suspension des sédiments dans la colonne d'eau. On retrouve d'ailleurs une relation positive entre la profondeur de la vase et les quantités d'azote dans l'eau.

La potentielle relation entre la quantité de nutriments et la présence et le recouvrement des plantes aquatiques à l'échelle de la communauté n'est pas ressortie dans cette étude, mise à part l'ammonium qui semble avoir une influence négative. Quelques études ont déjà été mené entre la conductivité de l'eau et les macrophytes aquatiques mais apportent des conclusions contradictoires : Thomaz *et al.* (2003) ont montré que certaines espèces de plantes aquatiques sont favorisées par une augmentation de la conductivité de l'eau ; Makela *et al.* (2004) ont rapporté une relation positive entre la conductivité de l'eau et la richesse spécifique, tandis que Murphy *et al.* (2003) ont trouvé des corrélations négatives entre ces paramètres.

Ces résultats sont bien sûr à modérer, les mares étant caractérisées par de faibles superficies, de faibles profondeurs et des bassins versants aux surfaces relativement faibles, elles sont très sensibles aux variations du milieu extérieur (Oertli *et al.*, 2013). L'étude s'étant menée avec un passage par mare, il n'a pas été possible de prendre en compte ces variabilités temporelles dans les paramètres abiotiques, et notamment ceux des paramètres physico-chimique de l'eau, dont les variations peuvent se produire sur une échelle de temps courtes (de l'ordre de la journée pour la température, l'oxygène dissous et le PH). Par ailleurs, les concentrations en nutriments dans l'eau reflètent mieux l'état trophique du milieu pendant la saison hivernale : les plantes aquatiques consommant les nutriments lors de la croissance végétative, de faibles concentrations mesurées lors de cette période ne sont pas nécessairement synonyme d'un niveau trophique faible (Williams *et al.*, 1999).

- Compétiteurs et prédateurs

Pour ce qui est de la présence de poissons et d'écrevisses exotiques dans les mares, les résultats ont bien montré une corrélation négative avec, à la fois la présence de plantes aquatiques, mais également avec leur recouvrement lorsque la mare était végétalisée, bien que le coefficient de corrélation reste relativement faible. Ce résultat peut largement s'expliquer par le petit nombre de mares en abritant dans le jeu de données.

En effet, plusieurs études ont déjà montré que le choix des espèces de poissons, leurs tailles et leur abondance peuvent fortement influencer les communautés végétales : une forte abondance de poisson fouisseurs ou brouteurs de grandes tailles (carpes, tanches...) va entraîner une augmentation de la turbidité (vérifiée dans les résultats) ainsi qu'un arrachage des végétaux pouvant conduire à la diminution voire la disparition des végétaux enracinés

(Jeppesen *et al.*, 1998 ; Miller & Crowl, 2006). De même, une forte abondance de poissons de petites tailles (gardons, alevins...) entraîne un broutage important du zooplancton et donc une augmentation du phytoplancton qui peut entrer en compétition avec les plantes aquatiques. Dans les milieux peu profonds et transparents, les macrophytes immergés ont un avantage puisqu'elles peuvent croître dès le printemps et, en consommant les nutriments dissous, limiter le développement du phytoplancton. A l'inverse, dans les eaux plus profondes ou moins transparentes, le développement du phytoplancton est moins limité et il peut impacter la croissance des plantes submergées par diminution de la lumière dans la colonne d'eau (Dutartre *et al.*, 2014). Par ailleurs, une grande partie des poissons sont omnivores, et vont avoir un impact direct sur les plantes aquatiques par prédation (Mandal *et al.*, 2010).

Les écrevisses exotiques dans les mares vont avoir des effets similaires sur les plantes aquatiques. En effet, vivant dans et sur le sédiment, elles vont entraîner sa remise en suspension, augmenter la turbidité de l'eau, et perturber la germination des propagules (Matsuzaki *et al.*, 2009 ; Lodge & Lorman, 1987). De plus, bien que majoritairement carnivores, elles peuvent devenir des herbivores facultatifs lors de fortes abondances d'écrevisses (Rodriguez *et al.*, 2003).

L'ACP a montré une légère influence négative de la présence de végétaux semi-aquatiques compétiteurs (roselières, cypéracées, algues et lentilles) sur le recouvrement des plantes aquatiques. Cependant, cette relation n'a pas été vérifiée statistiquement, probablement à cause des effets tout de même différents entre ces différents groupes espèces. Toutefois, ces effets ne sont pas à négliger : les héliophytes, notamment le roseau commun (*Phragmites australis*) ou les massettes (*Typha spp.*) sont capables de couvrir progressivement et parfois rapidement de vastes zones de biotope peu profondes, et former des roselières très denses qui vont éliminer la plupart des autres plantes (Dutartre *et al.*, 2014) si une prolifération n'est pas accompagnée d'une gestion.

Concernant les « lentilles d'eaux » ainsi que les algues filamenteuses, elles peuvent représenter une biomasse importante dans des mares bien éclairées et riches en nutriments du fait de leur grande compétitivité lors de ces conditions qui leur sont favorables (Scheffer *et al.*, 2003 ; Szabo *et al.*, 2010) ; Ainsi, leur fort développement à la surface de l'eau peut réduire voire éliminer les espèces de plantes aquatiques à cause d'une disponibilité en ressources limitées (lumière, nutriments, espace).

Il existe également des interactions biotiques entre les différentes plantes aquatiques, qui peuvent être négatives (compétition pour les ressources) ou positives (facilitation), mais ces interactions sont difficiles à évaluer en milieu naturel et sans plan d'expérience précis.

- A l'échelle de l'espèce :

Peu de tendances à l'échelle des espèces ont pu être mise en évidence. On peut toutefois observer une légère préférence pour le *Potamogeton natans* et dans une moindre mesure pour le *Potamogeton nodosus* pour des eaux plutôt profondes et turbides. Une étude réalisée par Engel & Nichols en 1994 avait montré l'apparition d'une communauté constituée en partie de *P. natans* suite au développement d'une forte turbidité dans un lac du Wisconsin dans les années 1970, communauté qui a persisté plus d'une décennie plus tard. D'autres études ont suggéré que des turbidités élevées favoriseraient la croissance des plantes à feuilles flottantes (i.e *Potamogeton sp.*) par rapport aux plantes totalement submergées

comme les *Characées* (Rodriguez *et al*, 2003 ; Moss, 1990). A l'inverse, le groupe des *Callitriches* s'est essentiellement retrouvé dans des eaux peu profondes et claires.

Les résultats ont montré que *Zannichellia palustris* semblait apprécier les zones peu profondes et perturbées par l'activité de pâturage, bien que ces résultats soient à modérer et à confirmer.

Concernant les Characées, connues pour être des espèces de milieux pionniers et se développant dans des eaux limpides (Lambert-Servien *et al.*, 2008) aucune de ces tendances n'est ressorti à l'échelle de l'étude, apportant de nouvelles perspectives d'étude pour ce groupe d'intérêt écologique fort.

Ce peu de tendances observées, s'explique facilement par le fait qu'en plus des nombreux facteurs qui vont influencer les communautés végétales, certaines espèces vont avoir des gammes de tolérance environnementales différentes. Des espèces dites euryèces vont avoir des valences écologiques élevées et supporter d'importantes variations de facteurs environnementaux. A l'inverse, des espèces sténoèces ne peuvent supporter que des variations limitées des facteurs écologiques, et sont donc considérées comme bio-indicatrices par leur intolérance au moindre changement d'un paramètre physico-chimique de leur milieu (Ramade, 2008 ; Triplet, 2015). Ces différences de valences écologiques entre les espèces expliquent donc facilement les résultats non significatifs obtenus pour les paramètres chimiques à l'échelle des communautés végétales, notamment sur les quantités de nutriments, facteur essentiel à leur croissance. Les espèces n'ayant pas les mêmes besoins en éléments nutritifs, ni les mêmes tolérances à leurs variations, ce qui ne peut être mis en évidence en analysant les compositions globales des communautés.

Le coefficient RV entre les deux tableaux n'est que de 0.26 mais est significatif et lors de statistiques à l'échelle de communautés végétales, au vu des nombreux facteurs d'influence et de leur variabilité, il est rare de trouver une valeur élevée de ce coefficient. Malgré cela, ce coefficient est significatif, signifiant qu'un quart des variations observées dans les variations de compositions floristiques dans l'étude, sont expliquées par les variations du milieu.

5 - Conclusions et perspectives

Il reste difficile de hiérarchiser les facteurs qui vont influencer la présence et la répartition des plantes aquatiques dans les points d'eau. En effet, ces facteurs sont de nature diverses (climatiques, morphologiques, trophiques...) et vont intervenir à des échelles de temps plus ou moins longues (journalière, saisonnière ou annuelle), sans compter la variabilité et les perturbations pouvant intervenir (événements météorologiques, ruissellement après un épandage d'engrais, ...).

En plus de cela, les résultats concernant les corrélations (positives ou négatives) ainsi que les interactions complexes et multiples entre les différentes variables n'ont malheureusement pas pu être analysés par des tests statistiques appropriés, faute de connaissances. En effet, les tests de corrélations de Spearman, sont insuffisants dans ce genre d'étude avec interactions entre les variables (multicolinéarité) car ils ne permettent pas de les prendre en compte. Ainsi, afin d'obtenir des résultats plus précis, il serait plus judicieux

de passer par exemple par une approche de modélisation en équation structurale qui permettrait de pallier à ces problèmes.

Cependant, malgré la non prise en compte de cette variabilité temporelle, les résultats de cette étude ne sont pas à négliger au vu du nombre important de prospection de mares et de paramètres mesurés, et compte tenu du manque de connaissances actuel. Le principal facteur de contrôle, en accord avec les quelques études effectuées sur le sujet et de par le caractère autotrophe des végétaux, semble être la turbidité de l'eau. L'ombrage, malgré son rôle dans la disponibilité de la lumière n'est pas ressorti comme un facteur d'influence significatif, bien qu'une tendance négative ait été observée sur le recouvrement, mais son estimation reste difficile. Il serait intéressant, pour les prochaines études d'évaluer avec plus de précision le rôle de ces deux facteurs, notamment avec des mesures plus précises de la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau, avec par exemple l'utilisation d'un disque de Secchi, à différents endroits de la mare, sur les zones d'herbiers et hors zones d'herbiers. La disponibilité de la lumière à la surface de la mare pourrait être évaluée à plusieurs heures de la journée, avec un appareil mesurant l'intensité lumineuse.

Dans une optique d'amélioration des conseils de gestion sur les mares, et notamment en contexte agricole, une meilleure compréhension de l'influence des nutriments sur les plantes aquatiques est essentielle. Le niveau trophique va dépendre de plusieurs paramètres (pente et occupation du bassin versant, quantité d'engrais ajoutée, bande tampon, nature des berges...) mais permettrait d'optimiser les conseils notamment sur les systèmes de protections rapprochées à la mare. Il pourrait également être ajoutée l'étude de l'impact des principaux herbicides utilisés en agriculture, qui de par leur mode d'action devraient certainement avoir un impact négatif sur les plantes aquatiques.

Il serait également intéressant de quantifier plus précisément l'impact des poissons et des écrevisses sur la présence et le recouvrement des plantes aquatiques, en évaluant notamment les communautés présentes, leurs densités et sur un plus grand nombre de mares. En effet, leurs impacts négatifs sur les plantes et le fonctionnement des petits écosystèmes d'eaux douces ont déjà été recensés, mais les études sont généralement focalisées sur les carpes. Cette quantification servirait d'appui aux conseils de non-introduction de poissons dans les mares, encore trop perçue dans l'imaginaire collectif comme une nécessité.

Une mesure également de la quantité de phytoplancton par la chlorophylle a pourrait être un paramètre intéressant, compétiteurs des macrophytes notamment dans les environnements riches en nutriments et turbides, et également une meilleure compréhension de l'influence des végétaux semi-aquatique compétiteurs sur les plantes aquatiques, variable sur laquelle les conseils de gestion peuvent facilement être tournés et améliorés.

L'analyse du sédiment pour les végétaux enracinés est également un facteur important à prendre en compte dans les futures études car ils participent à leur ancrage, à leur nutrition et à la possible augmentation du niveau trophique de l'eau lors de phénomènes de remobilisation. Ainsi, au même titre que la colonne d'eau il pourrait être fait une analyse détaillée des principaux nutriments (azote et phosphore).

A l'avenir, sur les autres études d'amélioration des connaissances sur les plantes aquatiques, il serait préférable de travailler à plus large échelle, au minima dans un programme à l'échelle régionale, qui permettrait à la fois de prendre en compte les facteurs à plus large échelles (climatiques, pédologique...), mais également d'obtenir davantage de données sur la

répartition des espèces et alors une meilleure compréhension des facteurs influençant leur présence et leur répartition.

Malgré leurs rôles écologiques fonctionnels, peu d'espèces de plantes aquatiques sont protégées. Certains habitats qu'elles forment sont protégés, notamment les herbiers de characées, au titre de la directive Habitats-Faune-Flore (directive 92/43/CEE). D'autres habitats aquatiques sont protégés par la loi sur l'eau mais seulement à partir d'un seuil réglementaire de 1000m² (articles L.214-1 et R.214-1 du Code de l'Environnement). Cependant, un grand nombre de mares possèdent des superficies bien inférieures à ce seuil et les plantes aquatiques ne sont donc protégées par aucune réglementation. De plus, contrairement à d'autres milieux, les mares sont peu connues et peu prises en considération par les services de l'Etat et les plantes aquatiques qu'elles abritent sont un groupe souvent sous-traité par les naturalistes et les techniciens de l'environnement, perçue comme difficilement identifiable. Par ailleurs, le grand public en a une perception plutôt négative, pensant qu'il s'agit de plantes exotiques, résultats de pollution ou d'insalubrité. De ce constat, il ressort un besoin de formation et de connaissances sur ces espèces par les acteurs de l'environnement, notamment sur le groupe des *Characées*, d'un fort intérêt écologique et également des « petits potamots » et des *Callitriches* dont la reconnaissance reste souvent difficile. Il serait également important de mettre en place des actions de sensibilisation pour les collectivités et le grand public. Ce stage s'est inscrit dans cette démarche d'amélioration des connaissances sur les plantes aquatiques mais il sera nécessaire de poursuivre ce travail. Il aura contribué à cette thématique, à son échelle, en fournissant des éléments supplémentaires non négligeables qui seront utiles aux structures partenaires, et celles travaillant déjà sur les mares, qui pourront ainsi se servir des données récoltées pour adapter leurs actions. A ce titre, la CATZH pourra intégrer les éléments démontrés dans ce mémoire afin d'améliorer ses conseils pour les points d'eau abritant des plantes aquatiques. Pour les mares sans végétation aquatique, elle pourra également évaluer les potentiels de colonisation de ces plantes en fonction des facteurs agissant sur ces points d'eau et leur typologie.

6 - Bibliographie

- Angelibert, S., N. Indermuehle, D. Luchier, B. Oertli, and J. Perfetta. (200) Where hides the aquatic biodiversity of macroinvertebrates in the Canton of Geneva (Switzerland)? *Archives Des Sciences.*, 59: 225-234.
- Bassi, N., Kumar Dinesh, M., Sharma, A., Pardha-Saradhi, P. (2014) Status of wetlands in India : A review of extent, ecosystem benefits, threats and management strategies. *Journal of Hydrology: Regional Studies.*, 2: 1-19.
- Begon, M., C. R. Townsend, and J. L. Harper (2006) Ecology : from individuals to ecosystems. 4th edition. *Blackwell publishing, Malden (USA), Oxford (UK) and Carlton (Australia)*, 738 pages.
- Bernard, P. (1994) *Rapport d'évaluation des politiques en matière de zones humides*. Paris, La Documentation française.
- Bin, F., Xu, P., Wang, Y., Yan, K., Chaudhary, S. (2018) Assessment of the ecosystem services provided by ponds in hilly areas. *Science of the Total Environment.*, 642: 979-987.
- Bouchard R, Higgins M, Rock C. (1995) Using constructed wetland-pond systems to treat agricultural runoff: A watershed perspective. *Lake and Reservoir Management*; 11(1): 29–36.
- Brönmark, C. and L. A. Hansson (2000) *The Biology of Lakes and Ponds*. *Oxford University Press, New York*, 211 pages.
- Capers, R.S., Selsky, R., and Bugbee, G.J (2009) The relative importance of local conditions and regional processes in structuring aquatic plant communities. *Freshwater biology*. 15 pages.
- Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec (CEAEQ). (2015) Détermination de la conductivité : méthode électrométrique, MA. 115 – Cond. 1.1, rév. 1, *Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques*, 9 pages.
- Ceschin, S., Zuccarello, V. and Caneva, G (2010) Role of macrophyte communities as bioindicators of water quality: Application on the Tiber River basin (Italy), *Plant Biosystems*, 144:3, 528-536,
- Carbiener, R., Trémolières, M., Mercier, J.L. *et al.* (1990) Aquatic macrophyte communities as bioindicators of eutrophication in calcareous oligosaprobe stream waters (Upper Rhine plain, Alsace). *Vegetation* 86, 71–88. <https://doi.org/10.1007/BF00045135>
- Chappuis, E., Ballesteros, E. and Gacia, E (2012) Distribution and richness of aquatic plants across Europe and Mediterranean countries : patterns, environmental driving factors and comparison with total plant richness. *Journal of Vegetation Science.*, 23: 985-997.
- Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., van der Ploeg, S., Anderson, S.J., Kubiszewski, I., Farber, S., Turner, R.K. (2014) Changes in the global value of ecosystem services. *Glob. Environ. Chang.* 26, 152–158. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>.
- Davidson, Nick C (2014) How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research* 65(10) 934-941 <https://doi.org/10.1071/MF14173>.
- De Groot, R., Brander, L., van der Ploeg, S., Costanza, R., Bernard, F., Braat, L., Christie, M., Crossman, N., Ghermandi, A., Hein, L., Hussain, S., Kumar, P., McVittie, A., Portela, R.,

- Rodriguez, L.C., ten Brink, P., van Beukering, P. (2012) Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosyst. Serv.* 1, 50–61.
- Den Hartog, C. & Segal S. (1964) A new classification of the waterplant communities. *Acta Botanica Neerlandica*. 13: 367–393.
- Dourmad, J-Y., Boudon, A., Narcy. A. (2020) Le phosphore dans les systèmes d'élevage. INRAE Productions Animales, INRAE, 33 (1), pp.31-40. [ff10.20870/productionsanimales.2020.33.1.3126ff](https://doi.org/10.20870/productionsanimales.2020.33.1.3126ff). [ffhal-02500414f](https://doi.org/10.20870/productionsanimales.2020.33.1.3126ff)
- Dutartre, A. Panorama des modes de gestion des plantes aquatiques : nuisances, usages, techniques et risques induits. (2002) Ingénieries eau-agriculture-territoires, Lavoisier ; IRSTEA ; CEMAGRE. 2p.29-42. [ffhal-00464690](https://doi.org/10.20870/productionsanimales.2020.33.1.3126ff)
- Dutartre, A., Peltre, M.C., Haury, J., Menozzi, M.J., Rebillard, J.P. (2014) Les macrophytes, partenaires ou concurrents ? *Sciences Eaux & Territoires*, INRAE., 15 : 2-7. [ffhal-01190173f](https://doi.org/10.20870/productionsanimales.2020.33.1.3126ff)
- Eau France [en ligne] (2020) Une zone humide, c'est quoi ? [Mis à jour le 21/01/2020]. Disponible : <http://www.zones-humides.org/entre-terre-et-eau/une-zone-humide-c-est-quoi>
- Engel, S and Nichols, S.A. (1994) Aquatic macrophyte growth in a turbid windswept lake. *Journal of Freshwater Ecology.*, 9: 97-109.
- European Pond Conservation Network (EPCN). (2008) The Pond Manifesto. 20 pages.
- European Pond Conservation Network (EPCN). (2010) – Manifeste pour les mares et les étangs. EPCN, 19 pages.
- Fenner, N. & Freeman, C. (2011) Drought-induced carbon loss in peatlands. *Nat. Geosciences*. 4, 895–900.
- Finalyson, M., Alder, J., Davidson, N., Lévêque, C., et al. (2005) Ecosystems and human well-being : wetlands and water synthesis. Millenium Ecosystem Assessment. Washington. *World Ressources Institute*. 81 pages
- Gaston, K.J and Blackburn, T.M. (2000) Pattern and Process in Macroecology. *Blackwell Science Ltd. Oxford.*, 377 pages.
- Heino, J., Virkalla, R., and Toivonen, H. (2009) Climate change and freshwater biodiversity: detected patterns, future trends and adaptation in northern regions. *Biological Review* 84:39-54.
- Jeppesen, E., Lauridsen, T.L., Kairesalo, T., Perrow, M.R. (1998) Impact of Submerged Macrophytes on Fish-Zooplankton Interactions in Lakes. In: Jeppesen, E., Søndergaard, M., Søndergaard, M., Christoffersen, K. (eds) The Structuring Role of Submerged Macrophytes in Lakes. *Ecological Studies*, vol. 131. Springer, New York.
- Keddy, P.A. Wetland ecology – Principles and Conservation (2010) *New York. Cambridge University Press* (2nd ed). 497 pages.
- Lacoul, P., Freedman, B (2006) Environmental influences on aquatic plants in freshwater ecosystems. *Environ. Rev.* 14: 89-136. doi: 10.1139/A06-001.
- Lambert- Servien E., Cazaubon A. , Peltre M.-C. et Laplace – Treyture C. (2008) : « De la connaissance des macro-algues : une première approche ». *Revue Ingénieries – Eau – 17 Agriculture – Territoires*, n° spécial « Plantes aquatiques d'eau douce : biologie, écologie et gestion : 9-21.

- Lodge DM, Lorman JG (1987) Reductions in submerged macrophyte biomass and species richness by the crayfish *Oronectes rusticus*. *Can J Fish Aquat Sci* 44: 591-597.
- Mandal, R.N., Datta, A.K., Sarangi, N. and Mukhopad, P.K. (2010) Diversity of aquatic macrophytes as food and feed components to herbivorous fish – a review. Wastewater Aquaculture Division, Central Institute of Freshwater Aquaculture, P. O. Rahara Kolkata-700 118, *West Bengal, India*.
- Mäkelä, S., E. Huitu & L. Arvola. (2004) Spatial patterns in aquatic vegetation composition and environmental covariates along chains of lakes in the Kokema"enjoki watershed (S. Finland). *Aquatic Botany* 80: 253–269.
- Matsuzaki SS, Usio N, Takamura N, Washitani I (2009) Contrasting impacts of invasive engineers on freshwater ecosystems: an experiment and meta-analysis. *Oecologia* 158: 673-686.
- Moss, B., 1990. Engineering and biological approaches to the restoration from eutrophication of shallow lakes in which aquatic plant communities are important components. *Hydrobiologia* 200/201:367–77.
- Mouronval J.B., Baudouin, S., Soulié-Märsche, I., Kleszczewski, M. (2015) Guide des Characées de France méditerranéenne. *Office National de la Chasse.*, 211 pages.
- Miller, S.A. & Crowl. (2006) Effects of common carp (*Cyprinus carpio*) on macrophytes and invertebrate communities in a shallow lake. *Freshwater Biology* 51, 85-94;
- Mitsch, W.J., Gosselink, J.G (2005) *Wetlands* (5th ed). United States of America. Wiley. 736 pages.
- Murphy, K. J., G. Dickinson, S. M. Thomaz, L. M. Bini, K. Dick, K. Greaves, M. P. Kennedy, S. Livingstone, H. McFerran, J. M. Milne, J. Oldroyd & R. A. Wingfield. (2003) Aquatic plant communities and predictors of diversity in a sub-tropical river floodplain: the upper Rio Parna´, Brazil. *Aquatic Botany* 77: 257–276.
- Oertli, B., Auderset Joye D., Castella, E., Juge, R., Lachavanne, J.-B. (2000) Diversité biologique et typologie écologique des étangs et petits lacs de Suisse. OFEFP. LEBA, Université de Genève, Genève.
- Oertli, B., Frossard, P.A (2013) Mares et étangs – Ecologie, gestion, aménagement et valorisation. Italie. *Presse polytechniques et universitaires romandes*. 480 pages.
- Pelatan, J. (1993) R&éflexion sur la recomposition récente des paysages ruraux dans les marges armoricaines. *Géographie et campagnes* 12 :125-132.
- Ramade F. (2008) Dictionnaire encyclopédique des sciences de la nature et de la biodiversité. Dunod Éd. Paris, 726 pages.
- Rodriguez, C.F., Bécares, E., Fernandez-Alaez. (2003). Shift from clear to turbid phase in Lake Chozas (NW Spain due to introduction of American red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*). *Hydrobiologia* 506-509: 421-426.
- Rosset, V. (2011) *Biodiversité des mares et étangs : impact du réchauffement climatique et de l'eutrophisation*. Thèse de Doctorat. Université de Genève et HES-SO//GE, Genève.
- Russi, D., ten Brink, P., Farmer, A., Badura, T., Coates, D., Förster, J., Kumar, R., Davidson, N. (2013) The Economics of Ecosystems and Biodiversity for Water and Wetlands. *IEEP, London and Brussels*.


- Sajaloli, B. & Dutilleul C., (2001) Les Mares, des potentialités environnementales à conserver, rapport final. *Centre de Bibliographie – Ecologie UMR 8505 CNRS – ENS LSH*.103 pages.
- Scheffer, M., S. Szabó, A. Gragnani, E. H. van Nes, S. Rinaldi, N.Kautsky, J. Norberg, R. M. M. Roijackers, and R. J. M. Franken. (2003) *Floating plant dominance as a stable state. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 100:4040–4045
- Soclo, H. (2003) Étude de l'impact de l'utilisation des engrais chimiques et des pesticides par les populations riveraines sur les écosystèmes (eaux de surface, substrat des réserves de faune) dans les complexes des aires protégées de la Pendjari et du W. Rapport d'étude. Cotonou: CENAGREF. [http:// www.cenagref.net](http://www.cenagref.net)
- Symoens, J.-J., Hooper, S.-S., Compère, P. (Eds.), (1982) Studies on aquatic vascular plants, Proc. Int. Coll. On Aquatic Vascular Plants, *R.Bot.Soc. Belgium*, Brussels, 424 pages.
- Szabo, S., M. Scheffer, R. Roijackers, B. Waluto, M. Braun, P. T.Nagy, G. Borics, and L. Zambrano. (2010) Strong growth limitation of a floating plant (*Lemna gibba*) by the submerged macrophyte (*Elodea nuttallii*) under laboratory conditions. *Freshwater Biology.*, 55:681–690.
- Thomaz, S. M., D. C. Souza & L. M. Bini. (2003) Species richness and beta diversity of aquatic macrophytes in a large subtropical reservoir (Itaipu Reservoir, Brazil): the limnology and morphometry. *Hydrobiologia* 505: 119–128.
- Triplet P. (2018) Dictionnaire encyclopédique de la diversité biologique et de la conservation de la nature. 4ème Éd., Baie de Somme, Grand Littoral Picard. France, 1096 pages.
- Williams, P., M. Whitfield, J. Biggs, S. Bray, G. Fox, P. Nicolet, and D. Sear. (2004) Comparative biodiversity of rivers, streams, ditches and ponds in an agricultural landscape in Southern England. *Biological Conservation* 115: 329-341.
- Williams P., Biggs, J., Whitfield, M., Thorne, A., Bryant, S., Fox, G., Nicolet, P. (1999) *The Pond Book : a guide to the management and creation of ponds*. Ponds Conservation Trust, Oxford.

7 - Annexes

Annexe 1. Les missions de la CATZH en 2019-2020



Annexe 2. Compte rendu de la réunion avec François Prud'homme (CBNPMP) discutant de différents points du plan d'échantillonnage.

			
Compte rendu Réunion de coordination			
DATE DE LA REUNION :	18/03/2022	ORGANISE PAR :	ADASEA 32
LIEU :	Visio	EMETTEUR :	ADASEA 32
PARTICIPANTS :	François PRUD'HOMME (CBNPMP), BLAU Laura et Guillaume Sancerry (CATZH 32)		

Thème : Présentation du stage sur les plantes aquatiques (ADASEA 32) et discussions sur la méthodologie

Objectif(s) : Echanger sur la méthodologie du stage et les échanges de données entre les deux structures.

Contenu :

- Présentation des missions de la stagiaire
 - Réaliser des mesures de variables sur des points d'eau abritant des plantes aquatiques
 - Réaliser un inventaire complémentaire des plantes aquatiques sur ces points d'eau
 - Réaliser une enquête d'usage et de gestion auprès des gestionnaires de ces points d'eau
- Laura présente le protocole prévu et les mesures qui seront prises sur le terrain.
- Données du CBNPMP. Le CBNPMP nous a envoyé un premier jeu de données de plantes aquatiques, toutefois, l'ADASEA se demande si d'autres plantes ne devraient pas être ajoutées comme les Alisma ou les plantes aquatiques exotiques envahissantes. François PRUD'HOMME nous conseille de se fixer sur un type de point d'eau (mare ou étang) car leurs fonctionnements sont trop différents. Par ailleurs, il serait plus cohérent de se fixer sur un type de plantes aquatiques de la classification de Hartog et Segal (1964). S'il manque des données revenir vers madame Hamdi pour les obtenir avec François PRUD'HOMME en copie.
- François PRUD'HOMME confirme que les inventaires complémentaires sur les sites retenus dans cette étude sont très intéressants. Par ailleurs, si Laura a le temps, elle pourra prospecter des points d'eau aux alentours de ceux qu'elle mesurera afin de faire plus de données. Il conseille l'utilisation de grapin pour faciliter l'observation des plantes poussant uniquement sur le fond comme les Chara par exemple.
- En ce qui concerne le nombre de sites à prospecter et les variables à mesurer, Laura se demande combien de sites minimums faut-il prendre en compte et s'il ne serait pas intéressant de mesurer certains éléments de l'eau par analyse en laboratoire. François PRUD'HOMME confirme, notamment pour les azotes et les phosphates, et incite l'ADASEA à travailler avec le laboratoire CSIC Blanes qui collabore sur cette thématique avec le CBNPMP. Les prix restent raisonnables, mais si cet investissement est trop important, le CBNPMP pourra éventuellement participer. François PRUD'HOMME propose de prendre lui-même contact avec le laboratoire pour voir si le partenariat est possible. Si ce n'est pas le cas, il faudra conserver les mêmes éléments à mesurer mais avec un autre laboratoire.
- En ce qui concerne le nombre de sites à échantillonner, François PRUD'HOMME conseille le plus possible mais une centaine reste très intéressante. Par ailleurs, il serait intéressant de suivre également des mares non végétalisées afin de répondre à la question « pourquoi cette mare est végétalisée et pas celle-ci ? »

1

Compte rendu

Réunion de coordination

-Laura souligne que certains paramètres des mares varient au cours de la journée et de l'année (les nutriments, O₂, le Ph...). Elle se pose donc la question de limiter le nombre de mares à échantillonner pour répéter les mesures au cours de la saison. François PRUD'HOMME trouve plus intéressant de suivre une fois sur l'année de nombreuses mares plutôt qu'un nombre limité plusieurs fois sur la saison afin d'avoir un jeu de données suffisant.

- François PRUD'HOMME indique que si certaines indentifications sont délicates, Laura pourra lui envoyer pour détermination.

Document(s) de travail :

-Premiers documents de travail de Laura.

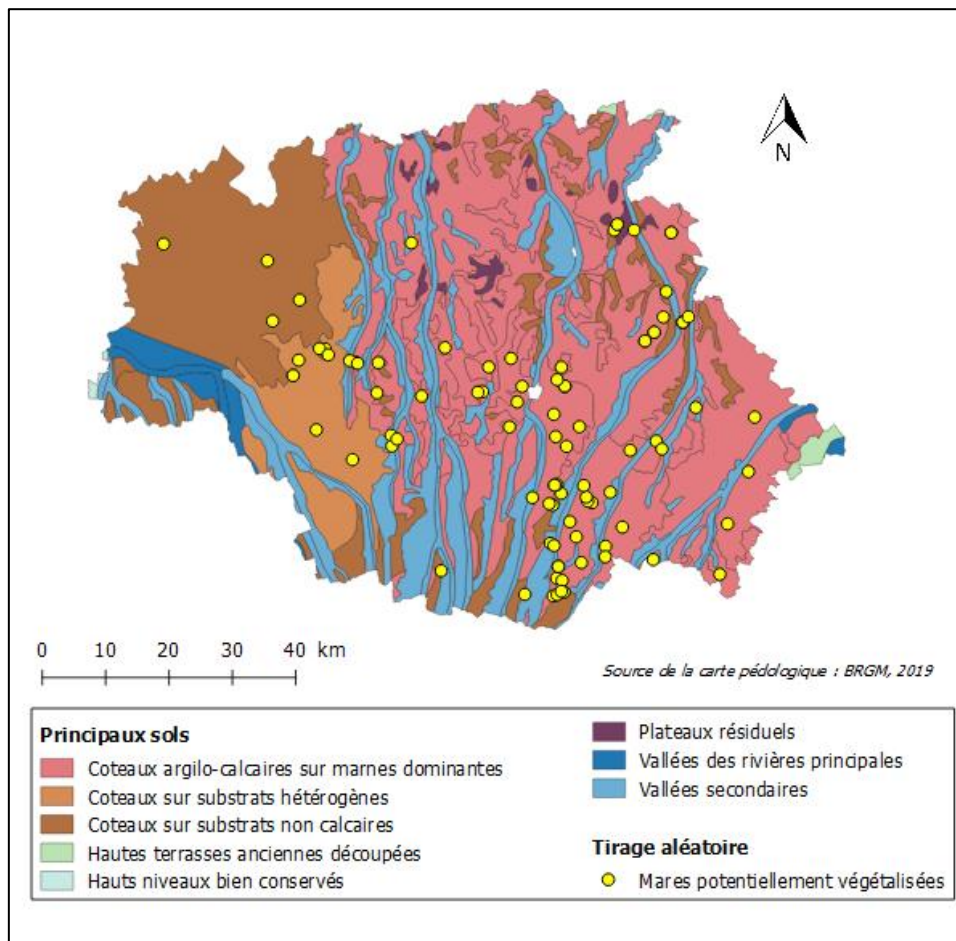
Conclusions :

-Faire valider le protocole à François PRUD'HOMME lorsque celui-ci sera terminé
-Faire un bilan avec François PRUD'HOMME une fois les prospections et les suivis terminés

Suites à donner :

Prévoir d'autres visio avec François PRUD'HOMME dans les mois à venir

Annexe 3. Carte du tirage aléatoire des mares effectué sur le département du Gers, en fonction des grands types de sols.



Annexe 4. Liste des espèces gardées dans l'étude (plantes aquatiques rhizophytes).

<i>Callitriches sp.</i>	<i>Myriophyllum alterniflorum</i>	<i>Potamogeton nodosus</i>
<i>Ceratophyllum demersum</i>	<i>Myriophyllum spicatum</i>	<i>Potamogeton natans</i>
<i>Ceratophyllum submersum</i>	<i>Myriophyllum verticillatum</i>	<i>Potamogeton nodosus</i>
<i>Chara contraria</i>	<i>Najas minor</i>	<i>Potamogeton perfoliatus</i>
<i>Chara globularis</i>	<i>Najas marina</i>	<i>Potamogeton polygonifolius</i>
<i>Chara vulgaris</i>	<i>Nuphar lutea</i>	<i>Potamogeton polygonifolius</i>
<i>Eichhornia crassipes</i>	<i>Potamogeton berchtoldii</i>	<i>Potamogeton pusillus</i>
<i>Eleodea canadensis</i>	<i>Potamogeton crispus</i>	<i>Potamogeton trichoides</i>
<i>Eleodella nuttallii</i>	<i>Potamogeton coloratus</i>	<i>Ranunculus aquatilis</i>
<i>Egeria densa</i>	<i>Potamogeton lucens</i>	<i>Ranunculus trichophyllus</i>
<i>Lagarosiphon major</i>	<i>Potamogeton natans</i>	<i>Persicaria amphibia</i>
		<i>Zannichellia palustris</i>

Annexe 5. Fiche terrain élaborée pour le projet

Fiche terrain						
Type point d'eau		Date	... / ... / ...			
ID		Code ADASEA				
Nom gestionnaire		Altitude				
Substrat géologique		Topographie	<input type="checkbox"/> haut de crête <input type="checkbox"/> milieu coteau <input type="checkbox"/> fond de vallée <input type="checkbox"/> plaine			
Référence prélèvement						
Contexte foncier	<input type="checkbox"/> public <input type="checkbox"/> privée	Pente BV	<input type="checkbox"/> Forte <input type="checkbox"/> Moyenne <input type="checkbox"/> Faible			
OS principale du BV						
Nature parcelle	Herbe (PT, jachère, PP...)	Bois	Grandes cultures	Vignes et vergers	Eau (étangs, mares...)	Total

Schéma du point d'eau :

Caractéristiques du point d'eau :

Type de berges	<input type="checkbox"/> Artificielle (....%) <input type="checkbox"/> Naturelle (....%) _Herbacée (.....%) _Boisée (.....%) _Nues (.....%)		
Forme de la mare	<input type="checkbox"/> Ronde <input type="checkbox"/> Rectangle <input type="checkbox"/> Patatoïde	Roselière (% de la surface de l'eau) %
% Autres plantes compétitrices / potentiellement invasives	Type : Cypéracées %	Type : Cresson %	Autre type : %
Conductivité	..... µS/cm	pH	
Granulométrie proximité	..... % argiles % limons % sables % éléments grossiers	Alimentation	<input type="checkbox"/> Source <input type="checkbox"/> Fossé <input type="checkbox"/> Drainage, pompage <input type="checkbox"/> Cours d'eau <input type="checkbox"/> Précipitations <input type="checkbox"/> Ruissellement
Physionomie	<input type="checkbox"/> Ouvert <input type="checkbox"/> Équilibré <input type="checkbox"/> Fermé	Pérennité	<input type="checkbox"/> Permanente <input type="checkbox"/> Temporaire
Profondeur moyenne colonne d'eau	.... cm	Surface	.... m ²
Profondeur moyenne vase*	.... cm	Sédiments principaux	<input type="checkbox"/> Vase <input type="checkbox"/> Débris végétaux <input type="checkbox"/> Gravier/sable <input type="checkbox"/> Cailloux
Pentes des berges	..... % pentes douces (0-45°) % pentes abruptes (> 45%)		
Piétinement bétail/ faune sauvage	<input type="checkbox"/> Fort <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/> Faible	Turbidité (classe + valeur disque Secchi)	<input type="checkbox"/> Nulle <input type="checkbox"/> Faible <input type="checkbox"/> Moyenne <input type="checkbox"/> Forte <input type="checkbox"/> Très forte Profondeur Secchi : cm
Ombage par ligneux (%)	..... %	Faune envahissante	<input type="checkbox"/> Ecrevisse <input type="checkbox"/> Ragondin/ sanglier <input type="checkbox"/> Autres :
Niveau de remplissage	<input type="checkbox"/> Assec <input type="checkbox"/> Abaissé <input type="checkbox"/> Plein	Présence de poissons	<input type="checkbox"/> Oui (préciser :) <input type="checkbox"/> Non
Présence de lentilles d'eau (si oui % de recouvrement)	<input type="checkbox"/> Oui (.....%) <input type="checkbox"/> Non		

Présence d'algues filamenteuses (si oui % de recouvrement)	<input type="checkbox"/> Oui (.....%) <input type="checkbox"/> Non
Autres dégradations potentielles	<input type="checkbox"/> Bouse bétail <input type="checkbox"/> Berges érodées <input type="checkbox"/> Canards ou autres herbivores <input type="checkbox"/> Autre :
Observations complémentaires :	
Surface végétalisée totale par PA %

Espèce	Taxons relevés	
	Recouvrement (%)	Profondeurs eau / vase
		..... cm / cm
		..... cm / cm
		..... cm / cm
		..... cm / cm
		..... cm / cm
		..... cm / cm
		..... cm / cm
		..... cm / cm
		..... cm / cm
		..... cm / cm
		..... cm / cm
		..... cm / cm
		..... cm / cm
		..... cm / cm
		..... cm / cm

Annexe 6. Paramètres mesurés en laboratoire dans chaque mare prospectée, leurs méthodes de mesures ainsi que leurs limites de quantification.

Paramètres (mg/l)	Méthode de mesure	Limite de quantification
Nitrates	NF en ISO 10304-1	0,5
Nitrites	NF EN 26777	0,01
Ammonium	NF T90-015-2	0,002
Orthophosphates	NF EN ISO 6878	0,02

Annexe 7. Fiche enquête gestionnaire.

Enquête gestionnaire mare

ID de la mare projet :
 ID ADASEA :
 Gestionnaire :
 Commune :
 Lieu-dit :

Personne passée dans la CATZH ou mare MAE :

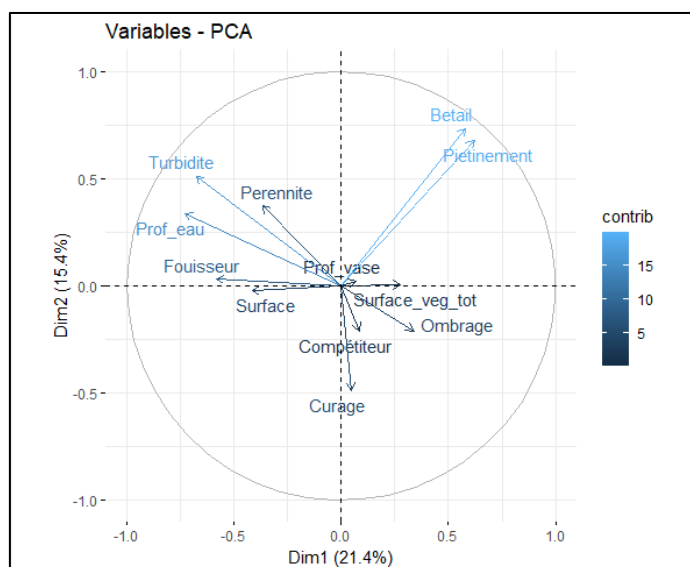
Description de la mare et de ses abords	
Usage actuel	
Age de la mare	<input type="checkbox"/> < 5 ans <input type="checkbox"/> 5 – 10 ans <input type="checkbox"/> 10 – 20 ans <input type="checkbox"/> > 20 ans
Alimentation en eau et trop plein	<input type="checkbox"/> Source <input type="checkbox"/> Fossé <input type="checkbox"/> Cours d'eau <input type="checkbox"/> Précipitations <input type="checkbox"/> Ruissellement <input type="checkbox"/> Drainage/ pompage
Environnement hydrologique	<input type="checkbox"/> Rivière, ruisseau <input type="checkbox"/> Lac, étang <input type="checkbox"/> Mares
Dégradations potentielles d'origine animale et végétale ?	
Présence d'espèces animales envahissantes ?	<input type="checkbox"/> Oui Préciser : <input type="checkbox"/> Non
Présence d'espèces végétales envahissantes ?	<input type="checkbox"/> Oui Préciser : <input type="checkbox"/> Non
Présence d'oiseaux herbivores	<input type="checkbox"/> Oui Préciser : <input type="checkbox"/> Non
Zone accessible au bétail ? (chevaux, vaches)	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
Dégradation potentielle d'origine anthropique ?	
Zones cultivées et traitées dans le BV de la mare ? Activité de la parcelle ?	<input type="checkbox"/> Oui Type de culture : Conventioneel / Bio Traitements :

	<input type="checkbox"/> Non
Actions réalisées sur la mare et ses abords ?	
Creusement (si création de la mare)	<input type="checkbox"/> Profondeur ?
Agrandissement ? Approfondissement ?	<input type="checkbox"/> Oui Date? Profondeur ?..... Surface enlevée? m2 Devenir des matériaux?..... <input type="checkbox"/> Non
Curage ?	<input type="checkbox"/> Oui Date? Profondeur ?..... Surface enlevée? m2 Devenir des matériaux?..... <input type="checkbox"/> Non
Reprofilage des berges en pentes douces ?	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
Gestion actuelle et entretien des berges ? <i>Arbres/ buissons sur les berges ? élagage, débroussaillage ?</i> <i>Avec quels outils ? Broyeur... ?</i> <i>Fréquence ?</i>	

Annexe 8 : Matrice des corrélations par la méthode Spearman entre les variables liées à la chimie de l'eau.

	Surface_veg_tot	NO3-	NO2-	NH4+	PO43-	ph	conductivite	Calcaire	Culture
Surface_veg_tot	1.00000000	-0.16321934	-0.2494187	-0.31817289	-0.060148148	0.042964548	-0.1961278	-0.01687551	-0.007929799
NO3-	-0.163219338	1.00000000	0.7590339	0.16101094	-0.259370318	0.047309730	0.5014552	0.24623498	0.334126144
NO2-	-0.249418733	0.75903393	1.0000000	0.42709519	-0.175653674	0.105864710	0.4935514	0.26110724	0.391790139
NH4+	-0.318172888	0.16101094	0.4270952	1.00000000	0.219120001	0.116357875	0.2669392	0.07248833	0.199044611
PO43-	-0.060148148	-0.25937032	-0.1756537	0.21912000	1.00000000	-0.001870143	-0.1306015	-0.23069482	-0.272969849
ph	0.042964548	0.04730973	0.1058647	0.11635788	-0.001870143	1.00000000	0.3188943	0.24346337	0.019426319
conductivite	-0.196127844	0.50145522	0.4935514	0.26693916	-0.130601504	0.318894340	1.0000000	0.30152955	0.343615837
calcaire	-0.016875511	0.24623498	0.2611072	0.07248833	-0.230694819	0.243463370	0.3015296	1.0000000	0.152836925
culture	-0.007929799	0.33412614	0.3917901	0.19904461	-0.272969849	0.019426319	0.3436158	0.15283693	1.00000000

Annexe 9. Cercle des corrélations entre les axes 1 et 2 de l'ACP réalisé sur les variables environnementales autres que celles relatives à la chimie de l'eau.



Annexe 10. Résultats de l'AFC sur les espèces les plus représentées dans les données, incluant le *Potamogeton bertcholdii* et sa contribution à l'axe 1, qui n'ont pu être interprétés.

